

Universidad Católica de Santa María

Facultad de Arquitectura, Ingeniería Civil y del Ambiente

Escuela Profesional de Ingeniería Civil



“COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE ALIVIADEROS ESCALONADOS EN PRESAS DE HCR”

Tesis presentada por el Bachiller:

Llanos Chaiña Arnold Julian

para optar el Título Profesional de

Ingeniero Civil

Asesor: Ing. Rendón Dávila Víctor Oscar

AREQUIPA – PERÚ

2017

AGRADECIMIENTOS

Ha sido un largo camino, todo comenzó como siempre con una idea, la cual ha involucrado a muchas personas, empiezo por agradecer a todas las personas que formaron parte de este trabajo. El sentimiento de gratitud es infinito hacia todos los involucrados y espero sepan comprender si se me olvida mencionar a alguien.

Mi más profunda gratitud a mi asesor el Ing. Víctor Rendón Dávila, quien aceptó la tarea de guiarme por el camino del proyecto. Por su amistad, por haberme incluido en el grupo de investigación el cual preside, por permitirme aprender de su amplia experiencia, por toda la ayuda a lo largo de las distintas etapas del trabajo, sin duda alguna sin su persona este trabajo no hubiera sido posible.

Al Ing. Percy Rucano Paucar, quien forma parte del equipo de investigación y me acompañó a lo largo de la investigación, por su gran capacidad de resolución de problemas, por el soporte a lo largo de la investigación, por ese optimismo y alegría que lo caracteriza.

Al grupo de investigación INGENIERÍA DE HIDROSISTEMAS, quienes trabajan con un único fin, el de contribuir con conocimiento a la sociedad. Al Dr. Manuel de la Rúa, por su valiosa contribución con la formulación de la metodología de investigación, gracias por todas y cada una de las horas de clases impartidas al equipo.

Agradecimiento especial a instituciones: Al laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Universidad Católica de Santa María, al Laboratorio de hidráulica de la Universidad Nacional de San Agustín, por permitirnos trabajar en sus instalaciones, brindando todas las facilidades y contribuyendo al trabajo realizado.

Al Dr: Martí Sánchez-Juny, quien contribuyó desinteresadamente con su amplia experiencia en investigación de aliviaderos escalonados. Gracias por tomarse el tiempo de revisar el planteamiento de la investigación, por sus valiosos aportes en las distintas etapas del trabajo realizado.

A los responsables de los laboratorios Tecnología del Concreto y Mecánica de Suelos de la Universidad Católica de Santa María. Al ing. Víctor Hidalgo Valdivia, jefe de los laboratorios, por su entusiasmo por el trabajo de laboratorio y por las facilidades prestadas. A Nairda e Isabel, encargadas de los laboratorios, por su ayuda, por el soporte en el trabajo y disponibilidad de instrumentos de laboratorio.

Al Arq. Carlos Rodríguez Quiroz por su valiosa contribución con la sesión de fotos del modelo, fabulosas tomas que se han conseguido.

A personas de gran corazón: la familia Rucano Llerena, de la cual me siento parte; don Percy y su maravillosa esposa doña Victoria, a Rossy y Raúl, y como no a Jérôme. Por su gran ayuda en las distintas etapas del trabajo, por abrirme las puertas de su hogar, es gracias a ellos es que se pudo culminar con el modelo experimental.

A dos personas con las cuales trabajamos hombro a hombro para la realización del proyecto Raúl y Santiago; Raúl, gran ser humano y amigo mío, por su gran ayuda en el diseño, construcción y operación del modelo hidráulico, importantísimo aporte de ideas y excelente trabajo el que ha realizado fabricando las distintas piezas del modelo. A Santiago, gran amigo y compañero de tesis, quién me acompañó a lo largo de la investigación, con quien superamos dificultades, momentos en los cuales parecía difícil seguir, sin embargo, continuamos hasta conseguir los resultados esperados. A los dos, por todas las dificultades que representó en transporte, armado y operación del modelo, por todos los días de trabajo y sobre todo por todos los gratos momentos a lo largo del trabajo.

A Dennis, uno de mis mejores amigos, por su valiosa ayuda, por la disponibilidad de movilidad para trasladar los equipos entre los laboratorios, por la rapidez con la cual maneja por las calles, reduciendo los tiempos de trabajo. Por todo el trabajo que involucra armar, desarmar, transportar y rearmar el canal hidráulico.

A Nairda, tuve la suerte de encontrar una buena amiga trabajando en los laboratorios, por todas las facilidades prestadas, por su ayuda (cambiar el aceite de las bombas no era tarea fácil) y por su buen ánimo que sabe expresar con esa risa que la caracteriza.

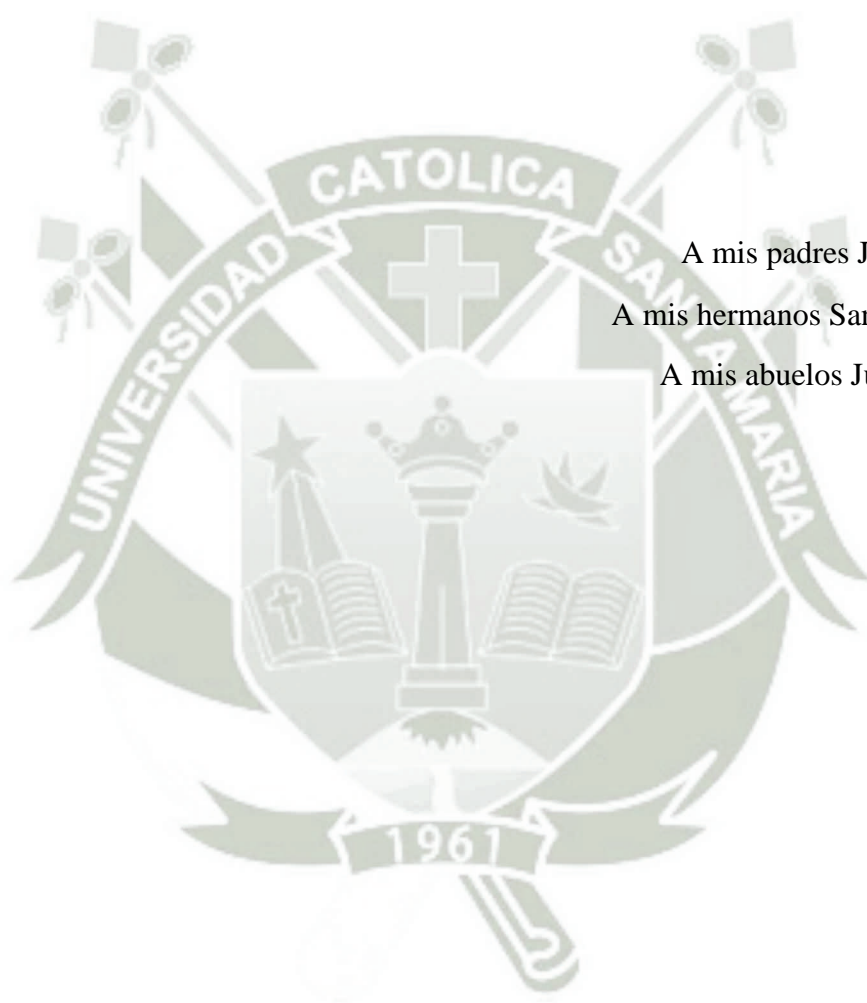
A Zumitta, por siempre darme ánimos para seguir adelante, por acompañarme a lo largo del trabajo realizado. Por su apoyo incondicional.

A los Ing. Juan Manuel Coaguila Rodriguez y Wilson Rojas Gomez, quienes al principio me mostraron el camino para la realización del presente trabajo.

Agradecer a grandes amigos, quienes desinteresadamente trabajaron formando parte del equipo en las campañas experimentales: Dennis, César, Gabriela, Sophia, David, Milton: gracias a ellos se pudo recopilar datos en el proceso experimental, gracias por su apoyo, entre trabajo serio y risas (con mucho ruido y olor a combustible). Por todo el esfuerzo que involucra registrar datos procedentes de los ensayos experimentales.

Infinita gratitud a mi familia, quienes me dieron el soporte necesario, a mis padres por sus buenos consejos, su bondad y el buen ejemplo y a mis hermanos porque siempre puedo contar con ellos y siempre estarán a mi lado.

Arequipa, Noviembre de 2017



A mis padres Julián y Jenny.

A mis hermanos Sandro y Franco.

A mis abuelos Justo y Leonor.

INTRODUCCIÓN

El avance en la tecnología ha permitido innovar procesos constructivos, desde los años 70 se potenció el método de construcción de presas denominado “Hormigón Compactado con Rodillo” (HCR) y este a su vez la investigación acerca del comportamiento hidráulico de aliviaderos con fondo escalonado. Las ventajas que tiene este tipo de aliviaderos son claras, la reducción del costo de construcción, la mayor disipación de energía y la reducción del tiempo de construcción, son las que más sobresalen.

Por los años 50' se observó la caída de la construcción de presas por gravedad de hormigón vibrado, debido al avance en equipos de movimiento de tierras, esto provocó la rápida expansión de presas construidas con el método de colocación de tierra y escollera, pero las presas construidas con materiales sueltos son más vulnerables a avenidas y procesos de erosión interna que las presas de hormigón, esto provocó el interés de mejorar el proceso constructivo de las presas, el en 1941 “Homer Hadley”, habló de la construcción de presas con un método que utilizaba concreto pobre compactado por capas, lo que él denominó “Presa de relleno de hormigón”, entre 1960 y 1965 tuvo por primera vez su confirmación práctica con la construcción de dos de las estructuras precursoras o antecesoras directas de lo que hoy denominamos “Hormigón Compactado con Rodillo (HCR)”: la construcción de la presa de “Shihmen” de 133 m. de altura (construida entre 1960 y 1961) y la presa de Alpe “Gera” de 178 m. de altura (construida entre 1961 y 1965).

Este tipo de estructuras no cuentan con modelo analítico confiable para predecir sus características, esto se debe a la turbulencia que se genera y el contenido de aire del flujo, por lo tanto, se hace necesario la construcción de modelos hidráulicos para visualizar y analizar su comportamiento.

RESUMEN

Este estudio previo a la obtención del título de ingeniero civil se realizó para analizar las características y disipación de energía de un aliviadero escalonado con relación de altura de grada (h), longitud de grada (l), $h/l=1.25$. Se utilizó un modelo hidrodinámico que consta de un canal de 12 m. de longitud y 0.46 m. de ancho y un aliviadero escalonado de diecisiete peldaños, cuyos cinco primeros escalones adaptan su altura a un perfil estricto tipo Creager. El modelo tiene un flujo de recirculación constante de agua, gracias a tres motobombas que succionan agua del depósito acumulador y la impulsan hasta el tanque de recepción de flujo. Se trabajaron con caudales que van desde 10.66 a 54.26 l/s.

Se analizó el flujo que se presenta para este tipo de estructuras, el comportamiento de la presión a lo largo de la rápida, ubicando piezómetros en distintas huellas del aliviadero y el punto de inicio de aireación se determinó de manera visual. Se propone una ecuación para determinar el umbral de cambio de flujo en transición a flujo rasante, con datos obtenidos de la experimentación y datos de Essery Horner (1972) y se propone una ecuación para determinar la disipación de energía en aliviaderos escalonados.

Para el rango de caudales ensayados se presentan dos tipos de flujo; flujo en transición y flujo rasante. El flujo en transición se caracteriza por tener un comportamiento irregular. El flujo rasante tiene un comportamiento regular, los que permite hacer una mejor descripción de este.

La disipación de energía se calcula a partir del trinomio de Bernoulli, se hacen comparaciones con la fórmula propuesta por Chanson (1994). Se determina que la disipación de energía disminuye conforme se aumenta el caudal y para valores elevados del caudal se determina que el porcentaje de energía es mucho menor en comparación a caudales bajos.

Palabras Clave: Aliviadero escalonado, Presa Hcr.

ABSTRACT

This study prior to obtaining the title of civil engineer was carried out to analyze the characteristics and energy dissipation of a stepped spillway with relation of height of step (h), length of step (l), $h/l = 1.25$. A hydrodynamic model consisting in a channel with 12 m. length and 0.46 m. of width and a stepped spillway of seventeen steps, whose first five steps adapt their height to a strict profile Creager type. The model has a constant flow of water recirculation, thanks to three motor pumps that take water from the storage tank and drive it to the flow reception tank. We worked with flow rates ranges from 10.66 to 54.26 l/s.

The flow presented for this type of structures were analyzed, the behavior of the pressure along the spillway, locating piezometers in different tracks of the spillway and the starting point of aeration was determined visually. An equation is proposed to determine the change of transition flow to skimming flow, with data obtained from the experimentation and data of Essery Horner (1972) and an equation is proposed to determine the dissipation of energy in stepped spillways.

For the range of flow utilized two types of flow are presented; transition flow and skimming flow. Transition Flow is characterized by having an irregular behavior. Skimming has a regular behavior, which allows a better description.

The dissipation of energy is calculated with the equation of Bernoulli, comparisons are made with the formula proposed by Chanson (1994). It is determined that the dissipation of energy decreases as the flow increases and for high values of the flow it is determined that the percentage of energy is much lower compared to low flow rates.

Keywords: Stepped spillway, Hcr Dam

ÍNDICE

CAPÍTULO I

1. ANTECEDENTES	1
1.1. DISEÑO TEÓRICO.....	2
1.1.1. JUSTIFICACIÓN	2
1.1.2. PROBLEMA.....	2
1.1.3. OBJETO.....	3
1.1.4. CAMPO DE ESTUDIO.....	3
1.1.5. OBJETIVO	3
1.1.5.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.2. HIPÓTESIS.....	4
1.3. RESUMEN DEL TRABAJO DESARROLLADO	4

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. CONCEPTOS	6
2.1.1. PRESA	6
2.1.1.1. CLASIFICACIÓN DE PRESAS	6
2.1.1.1. PARTES DE UNA PRESA	7
2.1.1.2. ALIVIADEROS.....	7
2.1.1.2.1. PARTES DE UN ALIVIADERO.....	8
2.1.1.2.2. TIPOS DE ALIVIADERO	9
2.2. ALIVIADEROS ESCALONADOS	13
2.2.1. REGÍMENES DE FLUJO SOBRE ALIVIADERO CON FONDO ESCALONADO 13	
2.2.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL TIPO FLUJO	13
2.2.1.2. FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN.....	14
2.2.1.3. FLUJO EN TRANSICIÓN	18
2.2.1.4. FLUJO RASANTE	20
2.2.2. UMBRAL DE CAMBIO DE FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN A RASANTE.....	24
2.2.3. AIREACIÓN SOBRE UN ALIVIADERO ESCALONADO	27
2.2.3.1. INTRODUCCIÓN	27
2.2.3.2. PUNTO DE INICIO DE AIREACIÓN EN FLUJO RASANTE	28
2.2.3.3. CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE AIRE	30

2.2.4. DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN EL ALIVIADERO	30
2.2.5. ENERGÍA DISIPADA EN UN ALIVIADERO ESCALONADO	32
2.2.5.1. INTRODUCCIÓN A ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE DISIPACIÓN DE ENERGÍA	32
2.2.5.2. ANÁLISIS EN MODELO FÍSICO DE ALIVIADEROS ESCALONADOS	33
2.2.5.3. ENERGÍA DISIPADA A PIE DE ALIVIADERO	33
2.2.5.3.1. ENERGÍA DISIPADA PARA FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN	33
2.2.5.3.2. ENERGÍA DISIPADA PARA FLUJO RASANTE	37
2.2.5.3.2.1. COEFICIENTE DE FRICCIÓN EQUIVALENTE	37

CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS DIMENSIONAL Y MODELADO	38
3.1.1. INTRODUCCIÓN	38
3.1.2. CLASES DE MODELOS	39
3.1.2.1. MODELOS MATEMÁTICOS	39
3.1.2.2. MODELOS ANALÓGICOS	40
3.1.3. MODELOS FÍSICOS REDUCIDOS	40
3.1.4. ANÁLISIS DIMENSIONAL Y SIMILITUD	40
3.1.4.1. DIMENSIONES Y UNIDADES	40
3.1.4.2. HOMOGENEIDAD DIMENSIONAL	41
3.1.4.3. ELIMINACIÓN DE DIMENSIONES DE LAS ECUACIONES	41
3.1.4.4. ANÁLISIS DIMENSIONAL Y SIMILITUD	41
3.1.4.4.1. SIMILITUD GEOMÉTRICA	42
3.1.4.4.2. SIMILITUD CINEMÁTICA	42
3.1.4.4.3. SIMILITUD DINÁMICA	42
3.1.4.5. TEOREMA PI BUCKINGHAM	44
3.1.4.6. APLICACIÓN DEL TEOREMA DE PI BUCKINGHAM	46

CAPÍTULO IV

4. DESCRIPCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA Y DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	53
4.1. INTRODUCCIÓN	53
4.2. MODELO HIDRODINÁMICO	53
4.2.1. CANAL HIDRODINÁMICO	53

4.2.2. ALIVIADERO ESTRICTO.....	53
4.2.2.1. CAUDAL EVACUADO SOBRE UN VERTEDERO AJUSTADO A LA LÁMINA VERTIENTE.....	54
4.2.2.2. COEFICIENTE DE DESCARGA DE UN ALIVIADERO DE PERFIL ESTRICTO.	55
4.2.2.3. DISEÑO DEL PERFIL TIPO CREAGER	58
4.2.3. MODELO DEL SISTEMA HIDRODINÁMICO	62
4.2.3.1. SISTEMA DE SUMINISTRO DE AGUA.....	63
4.2.3.1.1. MATERIALES	68
4.2.3.1.2. EQUIPO DE MANO	68
4.2.3.1.3. MAQUINARIA	69
4.3. TRABAJO DE LABORATORIO – METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	69
4.3.1. NIVELACIÓN DE LA ESTRUCTURA.....	69
4.3.2. PLAN DE PRUEBAS PARA EL MODELO DE ALIVIADERO ESCALONADO	69
4.3.3. CAUDALES A SER ENSAYADOS.....	70
4.3.4. DETERMINACIÓN DE TIRANTES Y PERFILES DE FLUJO.	71
4.3.5. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL.....	71
4.3.6. DETERMINACIÓN DE VELOCIDADES.....	72
4.3.7. DETERMINACIÓN DE PRESIONES.....	72
 CAPÍTULO V	
5. CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA.....	73
5.1. DETERMINACIÓN DE LÍMITES PARA LOS TIPOS DE FLUJO	73
5.1.1. LÍMITE INFERIOR DE LA ALTURA PARA LA FORMACIÓN DEL FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN.....	73
5.1.2. LÍMITE SUPERIOR PARA LA FORMACIÓN DEL FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN	75
5.1.3. LÍMITE INFERIOR FLUJO TRANSICIÓN	76
5.1.4. LÍMITE SUPERIOR FLUJO TRANSICIÓN	77
5.1.5. LÍMITE INFERIOR FLUJO RASANTE.....	78
5.2. CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA DEL FLUJO EN ALIVIADEROS ESCALONADOS	80
5.2.1. PERFIL DE FLUJO.....	81
5.2.1.1. ESQUEMA DE PERFILES DE FLUJO SOBRE EL MODELO HIDRODINÁMICO	83

5.2.1.1.1. FLUJO EN TRANSICIÓN	85
5.2.1.1.2. FLUJO RASANTE	88
5.2.1.2. VELOCIDADES CALCULADAS CON EL CALADO PROMEDIO.....	91
5.2.1.3. VELOCIDADES CALCULADAS A PIE DE ALIVIADERO.....	91
5.2.1.4. CARGAS PIEZOMÉTRICAS PROMEDIO.....	92
5.2.1.5. CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE LA ECUACIÓN DE BERNOULLI.....	96
5.2.1.6. CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE LA ECUACIÓN PARA FLUJO RASANTE	99
5.2.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS DATOS PROCESADOS.....	100
5.2.2.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN DE FLUJO EN TRANSICIÓN	100
5.2.2.1.1. PERFIL DE FLUJO EN TRANSICIÓN	100
5.2.2.1.2. ENTRADA DE AIRE PARA FLUJO EN TRANSICIÓN.....	101
5.2.2.1.3. DISIPACIÓN DE ENERGÍA – FLUJO EN TRANSICIÓN	102
5.2.2.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN DE FLUJO RASANTE	103
5.2.2.2.1. PERFIL DE FLUJO RASANTE	103
5.2.2.2.2. ENTRADA DE AIRE PARA FLUJO RASANTE.....	103
5.2.2.2.3. DISIPACIÓN DE ENERGÍA – FLUJO RASANTE.....	105

CAPÍTULO VI

6. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	107
6.1.1. ANÁLISIS DIMENSIONAL	107
6.1.2. EFECTOS DE ESCALA	107
6.1.3. UMBRAL DE CAMBIO A FLUJO RASANTE.....	109
6.1.4. RELACIONES DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA PARA VARIABLES ADIMENSIONALES	111
6.1.4.1. RELACIONES ENTRE VARIABLES GEOMÉTRICAS	111
6.1.4.2. RELACIÓN DEL TIRANTE CRÍTICO Y LA ALTURA DE ESCALÓN	112
6.1.4.3. NÚMERO DE REYNOLDS.....	113
6.1.4.4. NÚMERO DE FROUDE.....	113
6.1.4.5. NÚMERO DE EULER	114
6.1.5. PARÁMETRO PROPUESTO.....	114
6.1.6. COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN DE FLUJO RASANTE	

6.1.6.1. COMPARACIÓN DEL PORCENTAJE MEDIDO Y EL PORCENTAJE CALCULADO A PARTIR DE LA ECUACIÓN PROPUESTA POR CHANSON (1994)	116
6.1.6.2. COMPARACIÓN DEL PORCENTAJE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIDO CON EL PORCENTAJE CALCULADO A PARTIR DE LA ECUACIÓN PROPUESTA.....	117
6.1.7. DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIDA EN LABORATORIO PARA DIFERENTES CAUDALES	118
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	120
CONCLUSIONES	120
RECOMENDACIONES.....	123
ANEXOS.....	125
ANEXO A - PLANOS.....	126
ANEXO B - TABLAS.....	131
ANEXO C - GRÁFICOS.....	139
BIBLIOGRAFÍA.....	144

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura. 1.-Presa de Willow Creek Vista general (Estados Unidos, 1983).</i>	1
<i>Figura. 2.-Aliviadero en caída libre</i>	9
<i>Figura. 3.-Aliviadero con canal lateral y cuenco amortiguador.</i>	10
<i>Figura. 4.-Aliviadero en laberinto.</i>	10
<i>Figura. 5.-Aliviadero en conducción cerrada (Morning Glory)</i>	11
<i>Figura. 6.-Aliviadero dentado.</i>	12
<i>Figura. 7.-Aliviadero escalonado de la presa de Opuha.</i>	13
<i>Figura. 8.-Flujo en una caída.</i>	16
<i>Figura. 9.- Flujo escalón a escalón con resalto hidráulico parcialmente desarrollado.</i>	17
<i>Figura. 10.- Flujo escalón a escalón parcial.</i>	17
<i>Figura. 11.- Flujo en transición: Patrón de flujo agua aire en la zona de gradualmente variada.</i>	19
<i>Figura. 12.- Punto de entrada de aire para el flujo en transición.</i>	20
<i>Figura. 13.- Patrón de flujo en transición, Régimen de flujo gradualmente variado.</i>	20
<i>Figura. 14.- Flujo rasante con cavidad parcialmente ocupada por el flujo secundario.</i>	21
<i>Figura. 15.- Flujo rasante con una recirculación estable del flujo secundario.</i>	22
<i>Figura. 16.- Flujo rasante con recirculación estable del flujo secundario.</i>	22
<i>Figura. 17.- Regiones del flujo rasante sobre un aliviadero escalonado.</i>	24
<i>Figura. 18.-Límite del flujo escalón a escalón, para diversas inclinaciones de escalones (Essery Horner 1978).</i>	26
<i>Figura. 19.- Punto de inicio de aireación.</i>	27
<i>Figura. 20.- Velocidades a pie de aliviadero para un modelo escalonado 1/25 de un prototipo con una pendiente 1v:0.78h, y peldaños de h=0.61m (puntos blancos) y para uno no escalonado (puntos negros). Resultados a nivel de prototipo. (Sorensen(1984))</i>	31
<i>Figura. 21.- Figura de Galileo acerca del tamaño a escala de un hueso humano.</i>	39
<i>Figura. 22.- Proyección lineal del sistema modelo-prototipo</i>	44
<i>Figura. 23.-Elementos de perfil de un vertedero estricto</i>	54
<i>Figura. 24.-Coeficientes que definen el perfil del vertedero estricto</i>	55
<i>Figura. 25.-Coeficientes que definen el perfil del vertedero estricto</i>	56
<i>Figura. 26.-Coeficientes de descarga para vertederos estricto con pared vertical aguas arriba</i>	57
<i>Figura. 27.-Coeficiente de descarga para alturas de lámina de agua sobre la coronación diferentes a las de diseño</i>	58
<i>Figura. 28.-Detalle de escalones de transición (altura de contrahuella variable)^{PA}</i>	62
<i>Figura. 29.-Bomba de impulsión. Meba 13HP^{PA}</i>	64
<i>Figura. 30.-Corte de la plancha de acero para la estructura de soporte del aliviadero escalonado y vista de la estructura base ^{PA}</i>	65
<i>Figura. 31.-Detalle de los escalones de transición y Vista frontal de la estructura de soporte ^{PA}</i>	66
<i>Figura. 32.-Proceso de pintado estructura de soporte ^{PA}</i>	66
<i>Figura. 33Trazo para corte del metacrilato (a utilizar para los escalones) ^{PA}</i>	66

Figura. 34.-Curva del aliviadero, moldeado con pistola de aire caliente (sobre molde de madera) ^{PA}	67
Figura. 35.-Sellado del metacrilato mediante soldadura con metacrilato líquido ^{PA}	67
Figura. 36.-Abertura de agujeros para colocación de piezómetros ^{PA}	68
Figura. 37 Colocación de piezómetros en aliviadero escalonado ^{PA}	68
Figura. 38.-Nivelación del canal con nivel de ingeniero ^{PA}	69
Figura. 39.- Nivel de Ingeniero (Kern) ^{PA}	69
Figura. 40.-Panel piezométrico en funcionamiento ^{PA}	72
Figura. 41.-Predicción del tipo de flujo en rápidas escalonadas.....	80
Figura. 42.-Salto de agua a pie de aliviadero (modelo, vista general) ^{PA}	81
Figura. 43.-Salto de agua a pie de aliviadero (modelo) ^{PA}	81
Figura. 44.-Fotografía del perfil característico del flujo(modelo) ^{PA}	83
Figura. 45.-Esquema de perfiles de flujo sobre el modelo hidráulico (Coordenadas Tabla 14) ^{PA}	84
Figura. 46.- Velocidades a pie de aliviadero (m/s). Ubicación en el punto y_5 (1.873 m. eje "x"). Línea de tendencia exponencial ^{PA}	92
Figura. 47.-Cargas piezométricas a lo largo del aliviadero escalonado ^{PA}	92
Figura. 48.-Presión en la huella del escalón N° 1 piezómetros colocados a 8, 17 y 25mm. Desde la cara del contrapaso inmediatamente superior, Relación P/h con el parámetro adimensional y_c/h ^{PA}	93
Figura. 49.-Presión en la huella del escalón N° 3, piezómetros colocados a 10, 18 y 26.5 mm. desde la cara del contrapaso inmediatamente superior, Relación P/h con el parámetro adimensional y_c/h ^{PA}	94
Figura. 50.-Presión en la huella del escalón N° 6, piezómetros colocados a 10, 19.5 y 28.5 mm. desde la cara del contrapaso inmediatamente superior, Relación P/h con el parámetro adimensional y_c/h ^{PA}	95
Figura. 51.-Presión en la huella del escalón N° 9, piezómetros colocados a 10, 26.5 y 28 mm. desde la cara del contrapaso inmediatamente superior, Relación P/h con el parámetro adimensional y_c/h ^{PA}	95
Figura. 52. -Presión en la huella del escalón N° 12, piezómetros colocados a 9.5, 19 y 28 mm. desde la cara del contrapaso inmediatamente superior, Relación P/h con el parámetro adimensional y_c/h ^{PA}	95
Figura. 53.-Presión en la huella del escalón N°, 15 piezómetros colocados a 11, 18 y 27 mm. desde la cara del contrapaso inmediatamente superior, Relación P/h con el parámetro adimensional y_c/h ^{PA}	96
Figura. 54.- Cavidad de aire, presente en el rango de caudales de flujo en transición (tercer escalón) ($Q=11.64$ l/s modelo) [Fotografía: Rodríguez C.]	101
Figura. 55.-Perfil de flujo en transición. Flujo caótico, se visualiza salpicaduras pronunciadas ($Q=11.64$ l/s modelo) [Fotografía: Rodríguez C.]	101
Figura. 56.-Entrada de aire en el flujo en transición [Fotografía: Rodríguez C.]	101
Figura. 57.-Entrada de aire en el flujo en transición (vista general) [Fotografía: Rodríguez C.]	101
Figura. 58.-Relación del porcentaje de disipación de energía medido con el parámetro y_c/h , para el flujo en transición (datos completos) ^{PA}	102
Figura. 59.-Relación del porcentaje de disipación de energía medido con el parámetro y_c/h , para el flujo en transición(se obvia el resultado para $y_c/h=0.82$) ^{PA}	102

<i>Figura. 60.-Perfil de flujo uniforme, presente para el flujo rasante. ^{PA}</i>	103
<i>Figura. 61.-Perfil de flujo rasante, sin aireación, para $Q=45.15$ l/s (modelo) ^{PA}</i>	105
<i>Figura. 62.-Entrada de aire en el flujo rasante [Fotografía: Rodríguez C.]</i>	105
<i>Figura. 63.-Número de Reynolds para los caudales ensayados en laboratorio ^{PA}</i>	108
<i>Figura. 64.-Número de Weber para los caudales ensayados en laboratorio ^{PA}</i>	109
<i>Figura. 65.-Umbral de cambio a Flujo Rasante, Datos de Essery Horner (1978), Rajaratnam(1990) y Autor(2017). Datos presentados en la tabla 26 ^{PA}</i>	110
<i>Figura. 66.-Relación de la disipación de energía con el parámetro yc/h ^{PA}</i>	112
<i>Figura. 67.-Relación de la disipación de energía con el número de Reynolds (q/v) ^{PA}</i>	113
<i>Figura. 68.-Relación de la disipación de energía con el número de Froude $(v/(gy)^{(1/2)})$ ^{PA}</i>	114
<i>Figura. 69.-Relación de la disipación de energía con el parámetro propuesto $(F*yc/h)$ ^{PA}</i>	115
<i>Figura. 70.-Comparación del porcentaje medido y el porcentaje calculado a partir de la ecuación propuesta por Chanson (1994) ^{PA}</i>	116
<i>Figura. 71.-Comparación de valores representativos del porcentaje medido y el porcentaje calculado a partir de la ecuación propuesta por Chanson (1994) para el caudal específico $(q (m^3/s/m))$ ^{PA}</i>	116
<i>Figura. 72.-Comparación del porcentaje de disipación de energía medido con el porcentaje calculado a partir de la ecuación propuesta (datos completos $q (m^3/s/m)$) ^{PA}</i>	117
<i>Figura. 73.-Disipación de energía en función a los caudales específicos, se hace una verificación de las fórmulas que resultan de la aplicación del método de mínimos cuadrados ^{PA}</i>	118

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla. 1.- Caudales de cambio de régimen obtenidos por diversos autores según Chanson (1994).....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla. 2.- Resumen de la investigación en modelo físico de aliviaderos escalonados</i>	<i>36</i>
<i>Tabla. 3.-Magnitudes físicas (modelación hidráulica)^{PA}.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla. 4.- Altura de los escalones de transición.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla. 5.-Rango de caudales de laboratorio y extrapolación a prototipo (escalas 1/12, 1/18 y 1/24)^{PA}</i>	<i>70</i>
<i>Tabla. 6.-Límite inferior para el flujo escalón a escalón^{PA}</i>	<i>73</i>
<i>Tabla. 7.-Límite superior para el flujo escalón a escalón^{PA}</i>	<i>75</i>
<i>Tabla. 8.-Límite inferior para el flujo en transición^{PA}</i>	<i>76</i>
<i>Tabla. 9.-Límite superior para el flujo en transición^{PA}</i>	<i>77</i>
<i>Tabla. 10.-Límite inferior para el flujo rasante. Según Chanson (1994)^{PA}</i>	<i>78</i>
<i>Tabla. 11.-Límite inferior para el flujo rasante. Según Ohtsu Yasuda (1994)^{PA}</i>	<i>78</i>
<i>Tabla. 12.-Límite inferior para el flujo rasante. Según Amador Sanchez Dolz (2005)^{PA}</i>	<i>78</i>
<i>Tabla. 13.-Resumen de los tipos de flujo que se presentan en el modelo según diversos autores .^{PA}</i>	<i>80</i>
<i>Tabla. 14.-Coordenadas de los puntos de medición de los parámetros (modelo)^{PA}</i>	<i>82</i>
<i>Tabla. 15.- Coordenadas para el esquema de perfiles de flujo representativos (modelo, figura 42)^{PA}</i>	<i>83</i>
<i>Tabla. 16.-Caudal en modelo para el flujo en transición^{PA}</i>	<i>85</i>
<i>Tabla. 17.-Caudal específico en modelo para el flujo en transición^{PA}</i>	<i>85</i>
<i>Tabla. 18.-Tabla resumen del ensayo N°1-Q=11.088 l/s, correspondiente a flujo en transición^{PA}</i>	<i>86</i>
<i>Tabla. 19.- Caudales para el flujo rasante en modelo^{PA}</i>	<i>89</i>
<i>Tabla. 20.-Caudales específicos para flujo rasante en modelo^{PA}</i>	<i>91</i>
<i>Tabla. 21.- Presiones a lo largo del aliviadero, escalones 1, 3 y 6^{PA}</i>	<i>93</i>
<i>Tabla. 22.- Presiones a lo largo del aliviadero, escalones 9, 12 y 15^{PA}</i>	<i>93</i>
<i>Tabla. 23.-Cálculo de la energía disipada mediante el trinomio de Bernoulli, ensayo N°1, Q= 11.087 l/s (modelo)^{PA}</i>	<i>97</i>
<i>Tabla. 24.-Cálculo de la energía disipada mediante la ecuación de flujo rasante, ensayo N° 15^{PA}</i>	<i>99</i>
<i>Tabla. 25.- Conjunto de parámetros adimensionales.....</i>	<i>107</i>
<i>Tabla. 26.-Caudales de cambio de régimen obtenidos por los diversos autores, según Chanson (1994a).....</i>	<i>109</i>
<i>Tabla. 27.-Caudales de cambio de régimen obtenidos por los diversos autores, considerados para obtener el umbral de cambio, Autor*: valor obtenido de la presente investigación^{PA}</i>	<i>110</i>
<i>Tabla. 28.- Ecuaciones propuestas mediante un ajuste por mínimos cuadrados (Figura 59)^{PA}</i>	<i>111</i>
<i>Tabla. 29.- Ecuaciones de disipación de energía para caudal específico($q(m^3/s/m)$)^{PA} ...</i>	<i>119</i>

CAPÍTULO I

1. ANTECEDENTES

El “Hormigón Compactado con Rodillo “HCR””, tiene como hito la construcción de la presa de Tarbela, Pakistán (construida entre 1974 y 1982) supuso un primer paso importante para este método constructivo, con la colocación de más de 2.5 millones de m³ de hormigón HCR. La aplicación inicial fue la sustitución de una escollera de protección destruida en el colapso de un túnel durante el primer llenado. Esta reparación continuó con el refuerzo del cuenco amortiguador y de la contraguía.

En Japón las investigaciones se iniciaron en 1974 dando lugar a la técnica denominada RCD (Rolled Concrete Dam), que desembocó en la construcción de la presa “Shimajigawa”, terminada en 1980 con 89 m. de altura y de la losa de cimentación de la presa de “Ohkawa” (construida entre 1980 y 1981).

En 1974 la “Army Corps” de los Estados Unidos desarrolló una alternativa para presas de gravedad con Hormigón HCR para la presa de “Zintel” que finalmente se construyó de tierra, sin embargo, la alternativa sirvió como base para el desarrollo de la presa de “Willow Creek” que sería la primera presa del mundo construida íntegramente en HCR. [8], (Figura N° 1)



*Figura. 1.-Presa de Willow Creek Vista general (Estados Unidos, 1983).
Fuente. - J. Díez-Cascón - F. Bueno, Ingeniería de Presas,*

1.1.Diseño Teórico

1.1.1.Justificación

Los aliviaderos como elementos de una presa garantizan la seguridad del sistema hidráulico y disipa la energía para que la devolución de agua al cauce no provoque daños, aun así, la energía disipada por aliviaderos con fondo liso no es suficiente, por tal motivo, es necesario construir estructuras de disipación de energía al pie de los aliviaderos.

Para reducir o eliminar el costo de inversión en la construcción de estructuras de disipación de energía al pie de los aliviaderos se debe estudiar y comprender la capacidad disipadora de la estructura de alivio.

Debido al uso cada vez más frecuente del método de construcción de presas denominado “Hormigón Compactado con Rodillo (HCR)”, que por su proceso constructivo deja la estructura del aliviadero con un fondo escalonado, es necesario comprender el comportamiento hidráulico de este tipo de estructura.

1.1.2.Problema

El presente trabajo pretende analizar el comportamiento hidráulico en un aliviadero con fondo escalonado montado sobre un canal hidrodinámico, el aliviadero está compuesto por 17 (diecisiete) escalones, con una relación altura de grada, longitud de grada $h/l = 1.25$.

Los aliviaderos escalonados vienen siendo utilizados en las últimas décadas como solución para el paso de caudales excedentes provenientes de avenidas y un medio eficiente para la disipación de energía, debido a que, se ha innovado el proceso de construcción de las presas de hormigón macizas, con el avance de los métodos de construcción hoy en día se pueden realizar mediante el proceso de construcción denominado “Hormigón Compactado con Rodillo (HCR)”. Este crecimiento notable de la construcción de las presas “HCR” se debe a que tiene ciertas ventajas como, el tiempo de colocación de concreto se ha reducido, así como la reducción en las temperaturas de fraguado y las resistencias asociadas resultan mayores que los concretos convencionales.

El agua que corre en un aliviadero contiene una gran cantidad de energía y poder destructivo debido a las velocidades y presiones elevadas, éstas pueden erosionar

las estructuras de conducción, el pie de la rápida o el lecho del río. La erosión causa inestabilidad en las estructuras hidráulicas, por lo tanto, se debe utilizar un medio para controlar la energía que posee el flujo.

Sin embargo, no se cuenta con un modelo analítico confiable para predecir sus características, debido a la turbulencia que se genera y el contenido de aire de estos flujos, debido a esto se hace necesario hacer modelos hidráulicos para visualizar y analizar su comportamiento.

1.1.3.Objeto

Comportamiento de aliviaderos escalonados en las presas de Hormigón Compactado con Rodillo

1.1.4.Campo de estudio

Comportamiento de los aliviaderos escalonados mediante un modelo físico hidráulico en laboratorio, desarrollado a más de 2300 msnm.

1.1.5.Objetivo

1.1.5.1.Objetivo General

Determinar las principales características del flujo sobre un aliviadero escalonado y determinar la energía disipada.

1.1.5.2.Objetivos Específicos

- Analizar el comportamiento de Aliviaderos con fondo escalonado sobre un modelo con una configuración $h/l=1.25$, utilizando un canal hidrodinámico, a fin de conocer las características del flujo, encontrar el porcentaje de disipación de energía, distribución de presiones y las relaciones de resistencia al flujo.
- Determinar la variación de disipación de energía a medida que aumenta el caudal en el aliviadero con fondo escalonado.
- Determinar el punto de inicio de aireación en la rápida escalonada.

- Contribuir al establecimiento de nuevos criterios hidráulicos en el diseño de aliviaderos escalonados.
- Elaborar un texto de consulta que permita a estudiantes y profesionales acceder a datos y resultados aplicables de diseño de aliviaderos escalonados para presas de HCR.

1.2.Hipótesis

La energía disipada en aliviaderos con fondo escalonado es mayor a la de aliviaderos con fondo liso. La pérdida de energía obedece a la configuración de los escalones, es inversamente proporcional al aumento de caudal y para una configuración específica del aliviadero escalonado tiene un máximo rendimiento con un determinado caudal.

1.3.Resumen del trabajo desarrollado

El documento se organiza en 6 capítulos. En el Capítulo 1, se presentan los antecedentes, problema y justificación, se detallan los objetivos generales y específicos y finalmente se elabora una hipótesis para el trabajo a desarrollar.

En el capítulo 2, se escribe la base teórica que describe el comportamiento de los aliviaderos escalonados en presas de hormigón de concreto compactado. Estudios realizados en modelo reducido son citados. Se describen los tipos de flujo presentes en aliviaderos con fondo escalonado, que dependen del caudal circulante y la pendiente de la estructura, se hace una introducción a parámetros como el punto de inicio de aireación, la capacidad de transporte de aire y la energía disipada en este tipo de estructuras.

En el capítulo 3, se hace el análisis dimensional y modelado para el trabajo, se determinan las principales variables para el desarrollo de la investigación.

En el capítulo 4, se presenta el modelo hidrodinámico el diseño y la construcción. Se presenta el trabajo realizado en laboratorio, se proyectan los caudales a ser ensayados. Se revisa la metodología utilizada y el procedimiento de toma de datos en laboratorio

En el capítulo 5, se realiza la caracterización hidráulica del flujo, se determinan los límites para los distintos tipos de flujo, se presentan los resultados de las campañas experimentales, la disipación de energía, cargas piezométricas en las huellas de determinados escalones y el análisis de los perfiles de flujo.

En el capítulo 6, se presenta el análisis de las distintas variables en el comportamiento del flujo y se realizan comparaciones con fórmulas propuestas por diversos investigadores.

Seguidamente se presentan las conclusiones extraídas luego del análisis comparativo de pruebas de laboratorio, se brindan recomendaciones para la puesta en marcha de trabajos de investigación referentes a aliviaderos escalonados.

presenta anexos utilizados en el presente trabajo y, muestra los datos completos obtenidos en laboratorio.

Finalmente, la última parte recoge las referencias bibliográficas presentadas a lo largo del documento.



CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Conceptos

Se desarrollan los conceptos básicos que se ven implicados en el presente trabajo, tales como presas, aliviaderos y embalses de agua.

2.1.1. Presa

Estructura que se emplaza en una corriente de agua para embalsarla y/o desviarla para su posterior aprovechamiento o para proteger una zona de efectos dañinos de grandes avenidas.

2.1.1.1. Clasificación de presas

De acuerdo con la United States Bureau of Reclamation (USBR), las presas se pueden clasificar según el uso que se les da, diseño hidráulico y materiales utilizados en su construcción.

De acuerdo al uso se le puede clasificar en presas de embalse, derivación o retención y según su funcionalidad.

Las presas de embalse cuya función es la de retención de agua en periodos de abundancia para ser utilizada cuando el suministro sea escaso. Los periodos de retención suelen ser estacionales. Así mismo una subclasificación de presas de embalse se puede hacer determinando el uso que se le da al agua embalsada, pudiendo ser para abastecimiento, recreo, pesca y fauna, producción de energía, riego, etc.

Las presas de derivación usualmente se construyen para superar desniveles y generar carga de agua suficiente para transportar el agua hacia el lugar de utilización.

Las presas de retención se construyen para disminuir el efecto de grandes avenidas y regular el efecto de crecidas de ríos. Existen dos tipos principales de este tipo de presas, uno donde el agua se embalsa temporalmente y se desagua por un conducto regulado; el segundo tipo el agua se almacena el tiempo mismo en que tarda en infiltrarse en los estratos permeables que componen su estructura.

También se puede dar el caso de construir presas para usos múltiples, combinando los fines de los tipos descritos.

La clasificación de presas de acuerdo a sus características hidráulicas, existen dos tipos; presas vertedero y no vertedero.

Las presas vertedero desaguan agua por su coronación y las de tipo no vertedero son aquellas que no vierten agua por su coronación.

La clasificación según el material de construcción, pueden ser de gravedad, de hormigón o de arco hormigón.

Las presas de tierra, son el tipo más común debido a que se utilizan materiales en su mayoría en estado natural. El principal problema que presenta este tipo de presas es que puede sufrir daños en grandes avenidas, y sus periodos de vida no son largos debido a la erosión.

Presas de escollera, se construyen con rocas y se le coloca una pantalla impermeable que asegure la retención del líquido. Este tipo de presas también es vulnerable a desbordamiento por coronación, por lo que el aliviadero se debe construir con una capacidad que asegure la durabilidad.

Presas de gravedad de hormigón, utilizados cuando el terreno asegure una buena base para su apoyo, pueden ser de planta recta o curva.

Presas de arco hormigón, utilizadas cuando el ancho entre los estribos con respecto a la altura no sea grande y donde los estribos sean de roca lo suficientemente estable para resistir el empuje de los arcos.

Presas contrafuertes de hormigón, utiliza 60% menos de hormigón que las presas de gravedad, sin embargo, los costos en encofrado y acero sobrepasan en muchos casos al ahorro en hormigón.

2.1.1.1. Partes de una presa

Una pequeña presa está constituida principalmente por la presa misma, apoyos (estribos laterales) y la cimentación.

- Embalse (vaso de almacenamiento)
- Sección de control
- Aliviaderos o vertedores de excedencias
- Obras de toma
- Ductos de descarga
- Instalaciones generales (controles, vialidades, etc.)

Nos centraremos en los aliviaderos, tema de la presente investigación

2.1.1.2. Aliviaderos

El aliviadero puede formar parte de una presa o puede estar separado constituyendo una estructura independiente. Como parte de una presa, permite evacuar los excedentes de fluido provenientes de una avenida. Las compuertas permiten liberar los excedentes de un modo controlado, y no cuando estas no existen de modo no controlado por desbordamiento.

Los aliviaderos deben ser diseñados de forma correcta para asegurar la capacidad y durabilidad de la estructura, así mismo se debe escoger un tipo que se adapte a las condiciones del terreno, materiales y costo económico. Un mal diseño o falta de capacidad pueden provocar la rotura de la presa.

El aliviadero en general debe estar constituido por un material que sea resistente a la erosión. A pie de aliviadero se producen grandes velocidades debido a la diferencia de alturas, por lo que, se debe considerar elementos para la reducción de la energía.

2.1.1.2.1. Partes de un Aliviadero

➤ Estructuras de control:

Uno de los elementos principales, que regula el caudal de desagüe. Puede estar constituida un umbral, un vertedero, un orificio o una tubería. Pueden tener distantes ubicaciones o formas, de las cuales se pueden resaltar; en forma de U o circular y vertedero de pared delgada o gruesa.

➤ Canal de desagüe:

Normalmente el caudal desaguado por la estructura de control se conduce al cauce del río por medio de un canal de desagüe. Usualmente los canales siguen el perfil natural del terreno, sin embargo, hay ocasiones en que tienen que cruzar por medio de excavaciones (túneles). Obedece a la geografía del terreno y necesidades de la conducción de agua. Se revisten o no dependiendo de la resistencia a la erosión del material disponible para la construcción.

➤ Estructuras terminales:

La energía potencial producida por la diferencia de alturas, se traduce en energía cinética a pie de aliviadero, esto se manifiesta en forma de velocidades elevadas, por lo que, se deben colocar elementos que permitan disipar la energía para prevenir posible erosión, arrastres y daños en general a las estructuras contiguas.

➤ Canales de Toma y desagüe:

No siempre son necesarios, pero cuando se aprovechan depresiones naturales del terreno o en el caso que los aliviaderos estén contruidos a través de estribos. Los caudales excedentes son tomados por canales que conducen el agua hacia la estructura de control. Se debe tener especial cuidado con la velocidad de entrada, suavizando las transiciones con curvas, con el objeto de reducir las pérdidas de carga en el canal (lo que produce menor cantidad de caudal desaguado) y obtener caudal uniforme en la coronación del vertedero.

2.1.1.2.2. Tipos de Aliviadero

➤ Aliviaderos de Caída libre:

El agua cae libremente desde su coronación. Apropia para presas de contrafuertes, de arco de débil espesor o en aquellas con el paramento aguas abajo casi vertical.

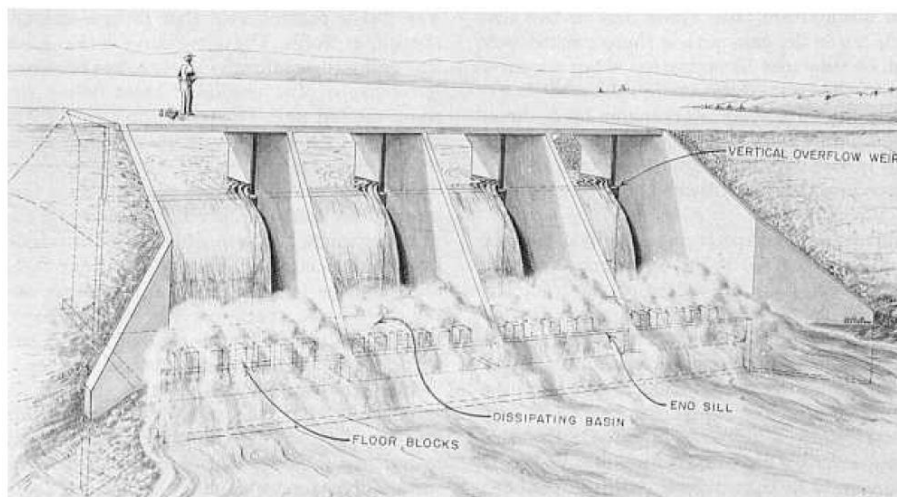


Figura. 2.-Aliviadero en caída libre

Fuente: *Design of Small Dams, United State Bureau of Reclamation, Pág 354*

➤ Aliviaderos con perfil que se ajusta a la lámina vertiente:

El perfil de este tipo de aliviadero se ajusta a la lámina inferior de la lámina vertiente del flujo en un aliviadero de pared delgada. Su perfil se asemeja a una forma S. Se logra que el flujo se adhiera al perfil del aliviadero, previniendo que quede aire atrapado entre las superficies.

➤ Aliviaderos Canales laterales:

El labio del aliviadero está situado aproximadamente en posición paralela o casi paralela al eje de la parte superior del canal de desagüe. La lámina vertiente cae en un canal estrecho, gira aproximadamente 90° y continua por el canal principal de desagüe. Es ventajoso cuando se desea disponer de un vertedero muy largo (a fin de reducir la altura de regulación) y las laderas son muy escarpadas; o cuando el dispositivo de control deba conectarse con un canal de desagüe estrecho o con un túnel. (Figura N° 3) (USBR-Design of Small Dams, 1987, p. 353)

➤ Aliviaderos en laberinto:

Su estructura añade longitud de coronación a un ancho dado de aliviadero, reduciendo la altura de la lámina vertiente. De gran utilidad cuando se tiene un

ancho determinado de coronación, la altura de la lámina de agua está limitada y se debe desaguar gran cantidad de agua. (Figura N° 4)

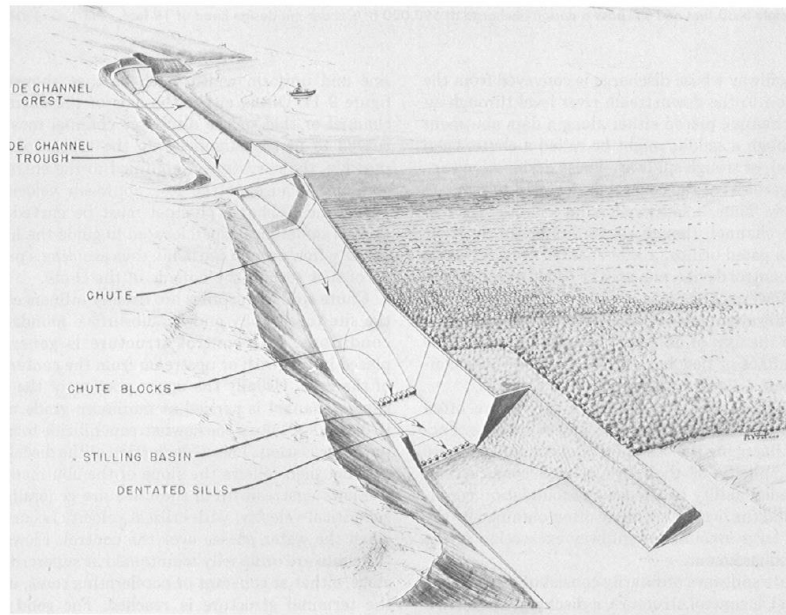


Figura. 3.-Aliviadero con canal lateral y cuenco amortiguador.
Fuente. - *Design of Small Dams, Unite State Bureau of Reclamation, Pág 355*

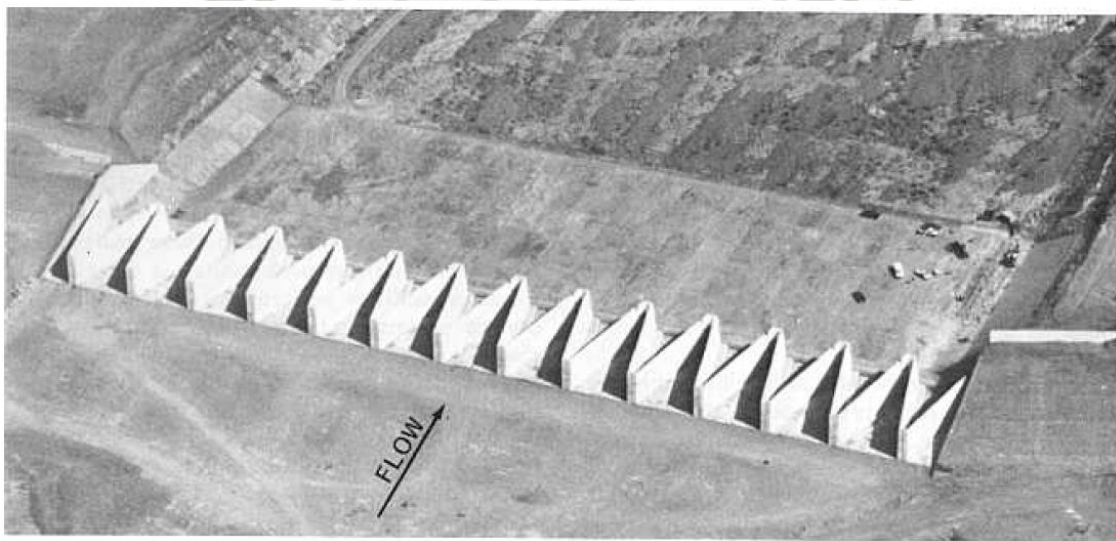


Figura. 4.-Aliviadero en laberinto
Fuente. - *Design of Small Dams, Unite State Bureau of Reclamation, Pág 356*

➤ Aliviaderos en rápida:

Un aliviadero cuya descarga es conducida del embalse al río aguas abajo por un canal abierto, situado a lo larfo de un estribo o un punto singular, se denomina rápida, canal abierto o canal de descarga (USBR-Design of Small Dams, 1987, p. 356)

➤ Aliviaderos en conducción cerrada o túnel:

Conductos cerrados que pasan por debajo de la presa o atravesando esta. El conducto puede ser un pozo vertical, inclinado o un túnel horizontal. Puede ser excavado o bien hecho como canal y luego recubierto con tierra o roca.

➤ Aliviaderos en pozo y vertederos circulares “morning glory”:

Tiene su estructura en el mismo embalse, el agua cae a un pozo vertical o casi vertical hacia una conducción horizontal que conduce el fluido hacia aguas debajo de la presa.

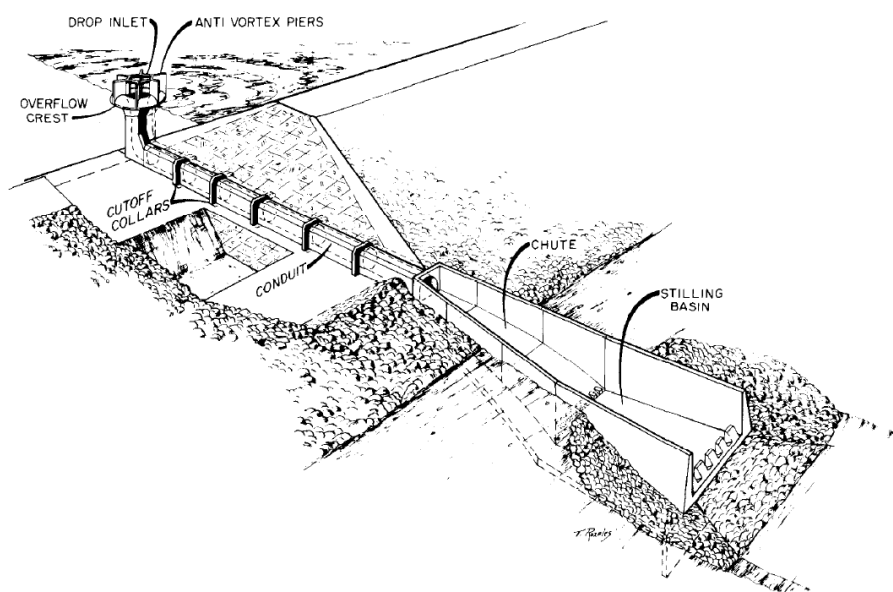


Figura. 5.-Aliviadero en conducción cerrada (Morning Glory)
Fuente. - *Design of Small Dams, Unite State Bureau of Reclamation, Pág 358*

➤ Aliviaderos dentados:

Sirve para cuando el agua debe vencer cierto desnivel y no se puede disponer de un cuenco amortiguador a pie de aliviadero. (Figura N° 6)

➤ Aliviaderos en conducto enterrado:

Al igual que los aliviaderos en conducto o túnel atraviesan la presa o pasan por debajo. Se distinguen porque su boca de entrada está colocada verticalmente o inclinada hacia aguas arriba o aguas abajo y su pendiente longitudinal es uniforme o casi uniforme y de cualquier valor.



Figura. 6.-Aliviadero dentado.

Fuente. - *Design of Small Dams, Unite State Bureau of Reclamation, Pág 360*



2.2. Aliviaderos Escalonados

En esta parte del capítulo se resume la base teórica acerca del comportamiento hidráulico de los aliviaderos con fondo escalonado, tomando como referencia los diferentes estudios realizados por diversos autores.



*Figura. 7.-Aliviadero escalonado de la presa de Opuha.
Fuente: Hydraulic Design of Stepped Spillways and Downstream Energy Dissipators for
Embankment Dams, Pág 255*

2.2.1. Regímenes de flujo sobre aliviadero con fondo escalonado

Sobre los aliviaderos escalonados se encuentran diferentes tipos de flujo, cuyo comportamiento obedece a la geometría del escalón y al caudal unitario circulante.

Diversos autores coinciden en la clasificación de los tipos de flujo que se presentan en aliviaderos escalonados, se clasifican en dos tipos de comportamiento: flujo escalón a escalón y flujo rasante, adicionalmente diversos autores mencionan un flujo de comportamiento particular denominado “flujo en transición” que se presenta en para caudales medios, que es un flujo entre el flujo escalón a escalón y el flujo rasante.

2.2.1.1. Características del tipo flujo

El tipo de flujo obedece a la geometría del escalón y al caudal unitario que circula por el aliviadero. El flujo escalón a escalón se produce para caudales unitarios bajos y/o bajas pendientes y su característica principal es que presenta una sucesión de caídas libres. El flujo rasante se presenta para caudales unitarios y pendientes elevados, cuya característica principal es que presenta una corriente que fluye por encima de los vértices de los escalones del aliviadero por encima de una capa ficticia

que se produce entre las aristas de los peldaños. Se presenta un tipo de flujo para caudales intermedios denominado flujo en transición, que se caracteriza por tener un comportamiento entre flujo escalón a escalón y flujo rasante.

2.2.1.2. Flujo escalón a escalón

Este tipo de flujo se establece para caudales unitarios y pendientes relativamente bajos, se caracteriza por una caída libre del chorro de agua de un escalón a otro de forma continua. El flujo sale de un escalón como una lámina libre e impacta en el siguiente peldaño, hay la posibilidad que se forme un resalto hidráulico en el paso al peldaño inferior, se observa la formación de un colchón sobre la superficie del escalón. Si el chorro impacta completamente en la huella, el régimen suele denominarse flujo escalón a escalón aislado y es subdividido en dos sub-régimenes: flujo escalón a escalón con resalto hidráulico totalmente desarrollado, que se presenta con bajos caudales unitarios, y el flujo escalón a escalón con resalto hidráulico parcialmente desarrollado. El resalto hidráulico es una característica importante para este tipo de flujo, ya que, puede ocurrir o no en el peldaño siguiente de donde sale la lámina de agua.

Basado en estudios experimentales Chanson (1994) propuso una expresión para el máximo caudal en el que se desarrolla completamente un resalto hidráulico, estableció una relación en función de la altura y la longitud del escalón.

$$\frac{y_c}{h} < 0.0916 \left(\frac{h}{l} \right)^{-1.276} \quad [1]$$

Donde:

y_c : Tirante crítico.

h : Altura del peldaño.

l : Longitud de la huella del escalón.

El límite inferior para la formación del flujo escalón a escalón es determinado por la siguiente ecuación.

$$\frac{h}{y_c} = 0.57(tg\theta)^3 + 1. \quad [2]$$

Determinado flujo que deja un escalón pasará de tirante subcrítico a tirante crítico para luego en el vertido pasar a régimen supercrítico, esto se repite en cada escalón del aliviadero, se pasa de un régimen subcrítico a supercrítico en cada escalón.

Para el desarrollo del flujo escalón a escalón aislado con resalto hidráulico totalmente desarrollado se debe tener pendientes bajas y longitudes de huella de escalón suficientemente largos, esto es poco frecuente en presas HCR, configuraciones como las mencionadas para la ocurrencia del tipo de flujo se utilizan en obras de regularización fluvial.

Cerca de la contrahuella existe una cavidad donde hay turbulencia y recirculación de agua, el aire ingresa a través de la lámina de agua y debido al impacto sobre el colchón de agua receptor.

La pérdida de energía en estos tipos de flujo ocurre por el impacto y la mezcla del chorro sobre el colchón de agua y por la formación del resalto en cada escalón.

Chanson (1994); mediante consideraciones de cantidad de movimiento presentó las siguientes ecuaciones:

$$\frac{d_1}{h} = 0.54 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{1.275} \quad [3]$$

$$\frac{d_2}{h} = 1.66 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{0.81} \quad [4]$$

$$\frac{d_p}{h} = \left(\frac{y_c}{h} \right)^{0.66} \quad [5]$$

$$\frac{L_d}{h} = 4.30 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{0.81} \quad [6]$$

$$\frac{d_i}{h} = 0.687 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{0.483} \quad [7]$$

$$\tan(\Theta) = 0.838 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{-0.586} \quad [8]$$

$$\frac{d_1}{h} = 8 \left(\left(\frac{y_c}{h} \right)^{1.5} - 1.5 \right) \quad [9]$$

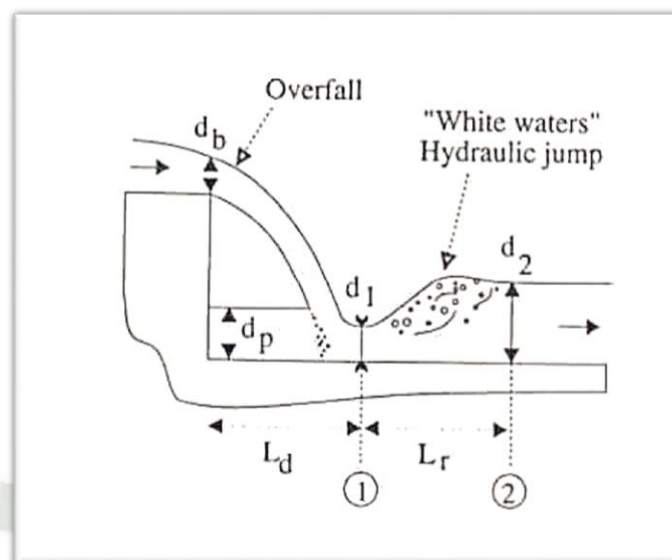


Figura. 8.-Flujo en una caída.
Fuente: *Hydraulics of nappe Flow regime above stepped chutes and spillways*, Chanson (1994)

Donde:

d_p : Altura del agua en la piscina detrás de la caída del chorro.

d_1 : Profundidad del flujo supercrítico aguas abajo del impacto del chorro.

d_2 : Profundidad del flujo supercrítico aguas abajo del resalto hidráulico

L_d : Distancia de la contracorriente hasta la posición " d_1 "

d_i : Espesor de la lámina de agua en el impacto en el colchón de agua de la huella.

θ : Ángulo del eje del chorro de agua en el impacto con la horizontal.

Las ecuaciones fueron validadas con numerosos resultados de experimentos, considerando flujos perfectamente aireados y huellas horizontales. No son válidas para escalones inclinados y escalones con umbrales. [Chanson 1994].

Las ecuaciones 2.2 a 2.8 proveen los principales parámetros de flujo para un flujo escalón a escalón con un resalto hidráulico completamente desarrollado. Peyras et al. (1991, 1992) indican que estas ecuaciones pueden ser aplicadas también con una razonable precisión a flujos escalón a escalón con resalto hidráulico parcialmente desarrollado. (Chanson 1994)

En el caso del flujo escalón a escalón aislado con resalto hidráulico parcialmente desarrollado el flujo no alcanza el tirante crítico, por lo que, siempre es supercrítico.

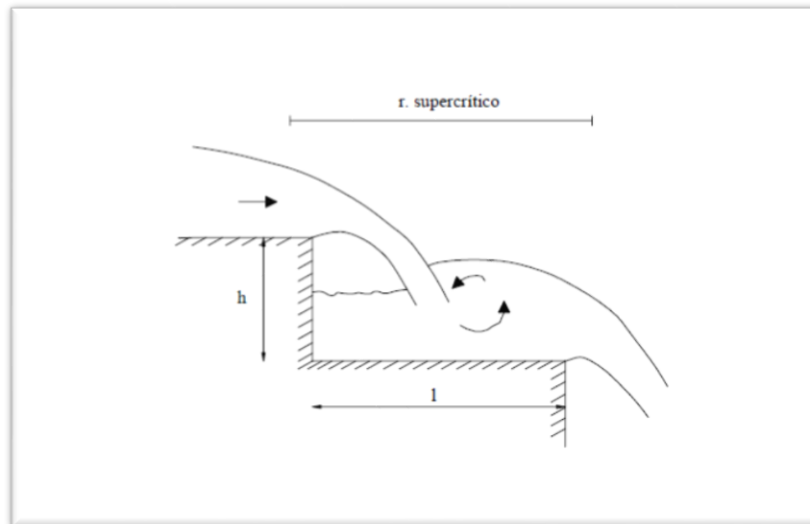


Figura. 9.- Flujo escalón a escalón con resalto hidráulico parcialmente desarrollado.
Fuente: Amador (2005)

Las ecuaciones de flujo escalón a escalón parcial no pueden ser previstas con cálculos analíticos.

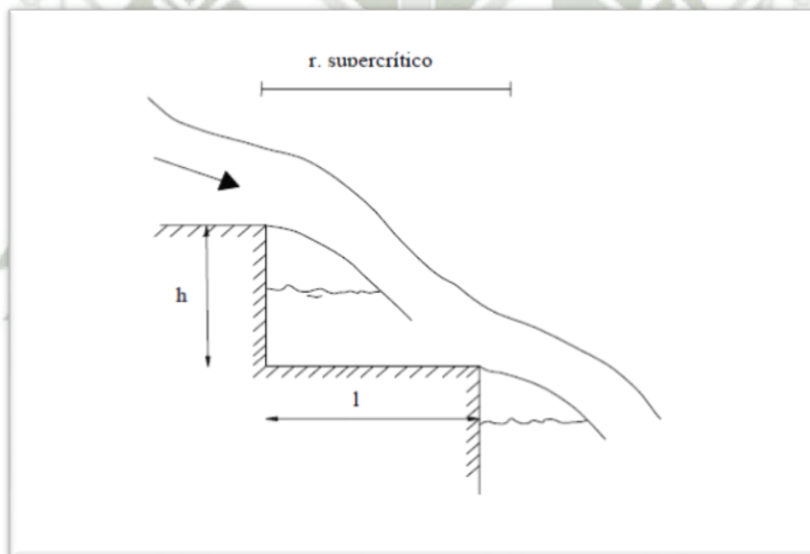


Figura. 10.- Flujo escalón a escalón parcial.
Fuente: Amador (2005)

Existe poca investigación experimental sobre el tipo de flujo, los estudios principales son los trabajos de Essery y Horner (1978), Peyras et. al (1992), Chanson y Toombes (1997) y Pinheiro y Fael (2000).

“Chanson (2002) propuso que el flujo escalón a escalón puede ser dividido en tres subtipos: Flujo escalón a escalón con salto hidráulico total o parcialmente desarrollado (tipo NA1 o tipo NA2, respectivamente) y tipo NA3 o flujo escalón a escalón sin salto”

2.2.1.3. Flujo en transición

Para una determinada geometría de escalón con un flujo intermedio, se desarrolla un flujo con un comportamiento comprendido entre flujo escalón a escalón y flujo rasante.

Con caudales pequeños que circulan por el aliviadero se produce el flujo escalón a escalón, cuyo comportamiento se describe como una lámina de agua que sale de cada escalón. Al incrementar el caudal que circula por las estructuras escalonadas se forma el flujo intermedio denominado “flujo en transición” al seguir aumentando el caudal se presentará el flujo rasante. Algunos investigadores reportaron condiciones de flujo transición entre los flujos escalón a escalón y rasante: Elviro & Mateos (1995), Cahnon (1996). Ohtsu & Yasuda (1997) fueron probablemente los primeros en introducir el concepto al régimen “flujo en transición”, a pesar de que ellos no estudiaron las propiedades de este tipo de flujo. Se sugirió que la transición entre flujo escalón a escalón y rasante está caracterizado por fluctuaciones hidrodinámicas fuertes y que este tipo de flujo debe ser evitado (Chanson 1995a). Hasta este momento las características del flujo en transición no pueden ser predichas por consideraciones teóricas. (Chanson 2002, p. 119).

Chanson (2002) en la universidad de “Quesland” Australia, realizó trabajos de investigación sobre dos modelos de rápidas escalonadas con pendientes de $3,4^\circ$ y 22° con alturas de escalón 0.071 m. y 0.1m. respectivamente. Las visualizaciones y medidas del flujo indican que el flujo aguas arriba es rápidamente variado. Aguas más abajo, el flujo se convierte gradualmente variado.

En una grada plana y una pendiente $\alpha=3.4^\circ$ (UQ) aguas arriba los patrones de flujo muestran una característica similar al flujo que se establece en el tipo de flujo denominado NA3 (Flujo escalón a escalón sin salto hidráulico). El promedio de la energía disipada en los primeros tres escalones fue significativa $\Delta H/H_{\max} \approx 30$ al 40%, aguas abajo en los siguientes cinco escalones, el flujo se vuelve gradualmente variado con pequeñas variaciones entre escalón y escalón, las características no fueron ni de flujo escalón a escalón ni flujo rasante.

Para las gradas con pendientes $\alpha=22^\circ$ (UQ), aguas arriba el flujo fue suave y transparente. En los primeros escalones, la superficie libre adoptó la forma de los escalones describiendo una superficie semejante al movimiento de olas. En las esquinas de los escalones se observó un poco de aireación inmediatamente arriba del punto de inicio de aireación. Aguas abajo del punto de aireación ocurren salpicaduras significantes. Para caudales menores (e.g. $d_c=0.65$) cavidades de aire se forman debajo de la lámina de agua y las cavidades de aire se pueden alternar de escalón a escalón, por ejemplo, una cavidad de agua se puede observar seguida de una larga lámina de agua.

Se observa flujo irregular a lo largo de los escalones debido a la constante variación en las propiedades del flujo en ciertas partes se muestran flujos de aire debajo de la

lámina de agua mientras que en otras el flujo secundario ya está establecido, lo que muestra un comportamiento caótico a lo largo de la estructura, Chanson (2002) sugiere evitar este tipo de flujo para el caudal del proyecto. Muestra como ejemplos los accidentes ocurridos en la presa Lahontan, EE-UU (1930-40) y la presa New Croton EE-UU. (1995) y un colapso del azud Gyandra, Australia (1989), son mencionados como casos donde el flujo presente era de transición.

Según Chanson y Tombes (2002), los límites para la determinación de flujo en transición son:

Límite inferior para la formación de flujo en transición:

Para el intervalo: $0 < \frac{h}{l} < 1.7$

$$\frac{Y_c}{h} > 0.9174 - 0.381 \frac{h}{l} \quad [10]$$

Límite superior para la formación del flujo en transición

Para el intervalo: $0 < \frac{h}{l} < 1.5$ (2.2.10)

$$\frac{Y_c}{h} < \frac{0.9821}{\left(\frac{h}{l} + 0.388\right)^{0.384}} \quad [11]$$

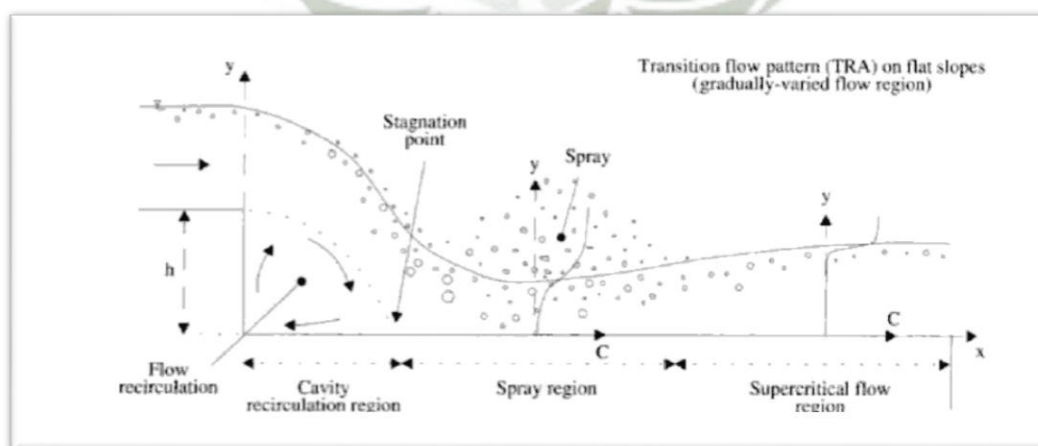


Figura. 11.- Flujo en transición: Patrón de flujo agua aire en la zona de gradualmente variada.
Fuente: Chanson (1994)

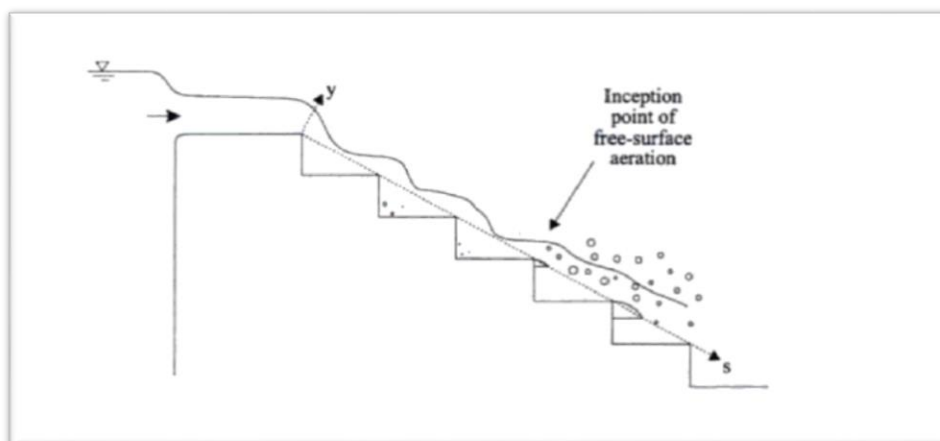


Figura. 12.- Punto de entrada de aire para el flujo en transición.
Fuente: Chanson (1994)

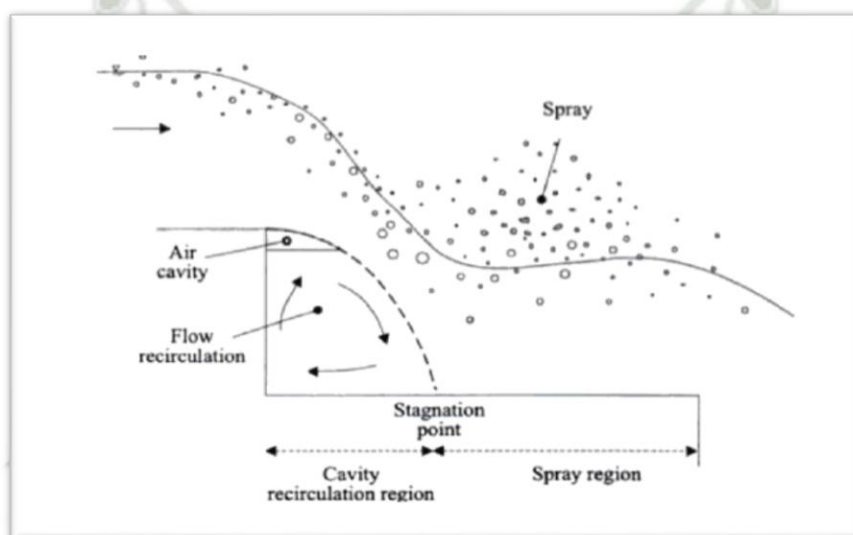


Figura. 13.- Patrón de flujo en transición, Régimen de flujo gradualmente variado.
Fuente: Chanson (1994)

2.2.1.4. Flujo rasante

Es el tipo de flujo que se presenta en la mayoría de casos de aliviaderos escalonados, posee una alta concentración de aire y por el volumen de caudal que lleva provoca una inmersión total de los escalones del aliviadero, esto ocurre cuando el aire de las cavidades que se forma de la caída de chorro desaparece en todos los escalones a lo largo de la estructura, se forma una lámina superior que circula sobre un falso fondo formado por los bordes de cada escalón, se forma una cavidad entre los bordes de las gradas con la huella, la contrahuella y el falso fondo haciendo una figura de forma triangular donde existe recirculación de flujo denominado vórtices de circulación, con concentraciones de aire importantes.

La fricción que existe entre el vórtice de circulación y la lámina que se encuentra por encima del falso fondo provee la energía suficiente para que haya constante movimiento rotacional dentro del vórtice. Dentro de la cavidad triangular formada debajo del falso fondo se producen los vórtices de recirculación que producen una disipación de energía extra en cada escalón y el falso fondo al ser una superficie virtual, el falso fondo no impide que el flujo salte o golpee entre las superficies.

- Flujo rasante con cavidad parcialmente ocupada por el flujo secundario (wake-step interference).

Cavidad donde recircula el fluido es delgada y alargada tornándose imposible una recirculación estable.

Los vórtices no ocupan la totalidad de la cavidad delimitada por los vértices de los escalones. La superficie libre exhibe un patrón ondulatorio. Ocurre para bajas pendientes (pendientes $< 12^\circ$ a 15°)

Flujo secundario inestable cavidad donde recircula el fluido es delgada y alargada tornándose imposible una recirculación estable.

La superficie muestra patrón ondulatorio.

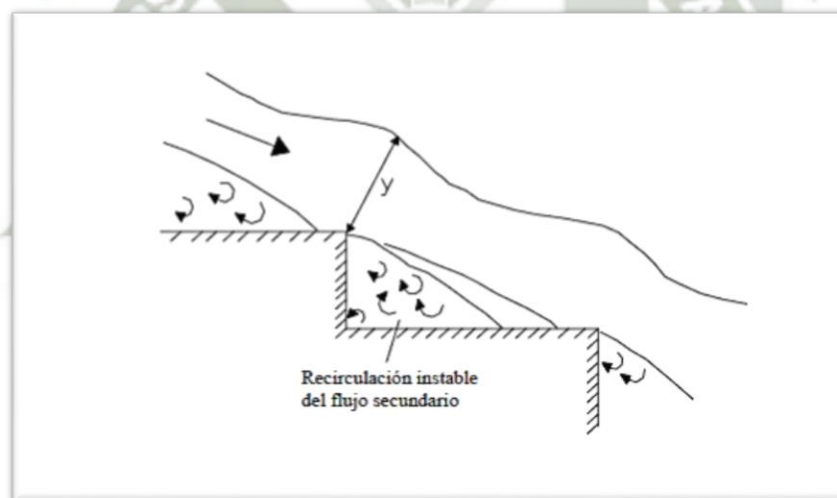


Figura. 14.- Flujo rasante con cavidad parcialmente ocupada por el flujo secundario.
Fuente: Chanson (1994)

Para pendientes entre 12° a $15^\circ < \alpha < 15^\circ$ a 25° , la pseudo solera interfiere con la siguiente, y casi no hay fricción en el peldaño, se trata del sub-régimen denominado flujo rasante con cavidad casi-totalmente ocupada. (Figura N° 15)

Pendientes mayores ($> 25^\circ$ a 30°), la recirculación cubre totalmente la cavidad delimitada por los vértices exteriores de los escalones. (Figura N° 16)

Recirculaciones estables son observadas para cavidades con una relación altura/longitud ($\sin(\alpha) \cos \alpha$) de 0.4 a 0.45, lo que significa pendiente mayor a 27°

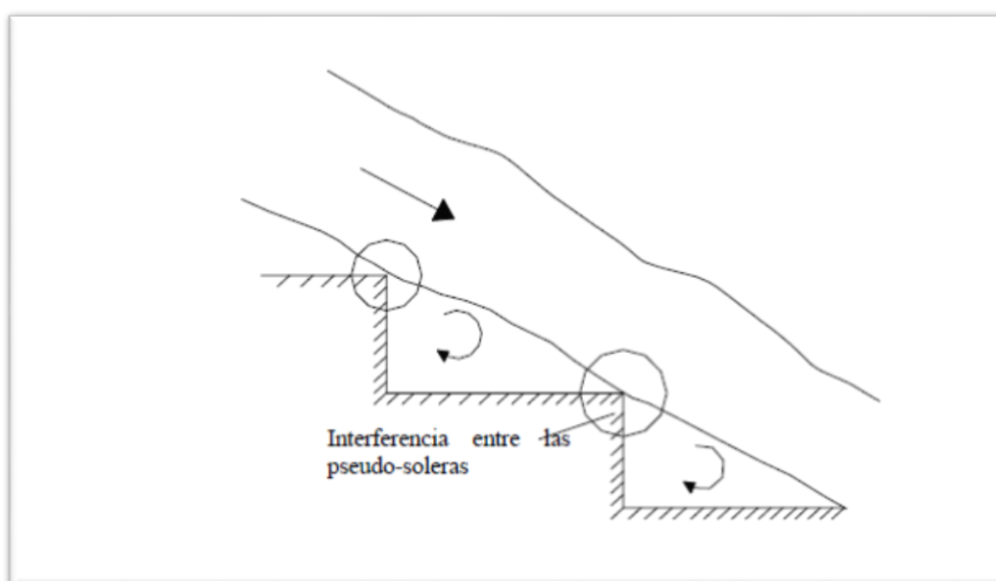


Figura. 15.- Flujo rasante con una recirculación estable del flujo secundario.
Fuente: Chanson (1994)

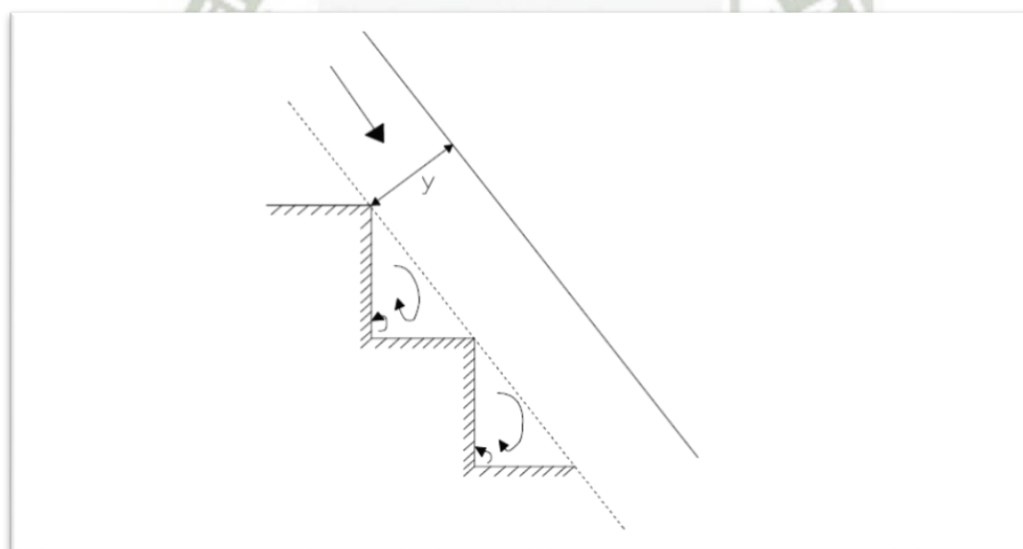


Figura. 16.- Flujo rasante con recirculación estable del flujo secundario.
Fuente: Chanson (1994)

La pseudo-superficie que separa el flujo superior y el secundario no está siempre definida por los vértices de los peldaños, su posición puede impactar o separarse de los vértices exteriores dependiendo del peldaño. Aunque exista una recirculación estable para diferentes peldaños, los vórtices principales no están siempre en la misma posición, y eso se refleja en las mediciones de presión realizadas en el centro de simetría de las huellas de los escalones a lo largo del aliviadero.

Para un aliviadero escalonado con un régimen de flujo rasante los estudios han permitido diferenciar hasta 4 zonas en cuanto a su comportamiento (véase la figura N° 17) (Estrella 2005, p. 11)

- Zona 1: Ubicada inmediatamente aguas abajo de la cresta, cuya superficie libre del flujo es suave en los primeros escalones y no existe entrada de aire hasta el denominado “punto de inyección de entrada de aire” que se ocasiona cuando la zona superior de la capa límite alcanza la superficie libre.
- Zona 2: A partir del punto de inyección de aire se observa una zona de flujo rápidamente variado donde la aireación del flujo no ocupa la totalidad de la sección transversal.
- Zona 3: Al flujo rápidamente variado le sigue una zona con flujo gradualmente variado donde la aireación ocupa la totalidad de la sección.
- Zona 4: Finalmente se alcanza el equilibrio entre las fuerzas de gravedad y de fricción, el flujo será completamente desarrollado y para un caudal no existirá variación de concentración de aire, calado o velocidad en el flujo, es decir, se producirá flujo uniforme.

Límite inferior para la formación de flujo rasante

Chanson 1994

$$\frac{Y_c}{h} > 1.057 - 0.465 \frac{h}{l} \quad [12]$$

Ohtsu y Yasuda 1999

$$\frac{Y_c}{h} > 0.862 \left(\frac{h}{l} \right)^{-1.65} \quad [13]$$

Amador Sánchez Dolz 2005

$$\frac{Y_c}{h} = 0.854 \left(\frac{h}{l} \right)^{-0.169} \quad [14]$$

Límite superior de la altura de escalón para la formación de flujo rasante.

Para $0.1 \leq \tan \theta \leq 1.43$

$$\frac{h}{Y_c} = 1.16 (\tan \theta)^{0.165} \quad [15]$$

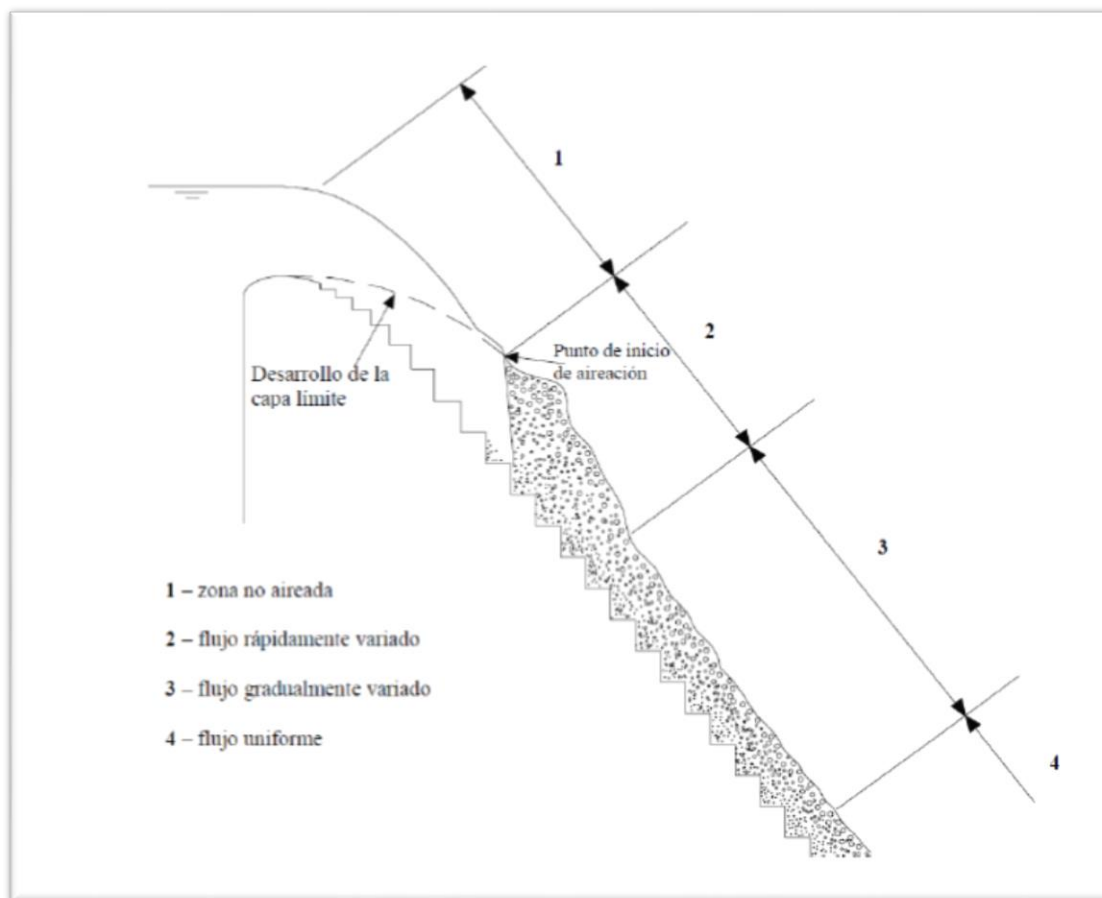


Figura. 17.- Regiones del flujo rasante sobre un aliviadero escalonado.
Fuente: Amador 2005

2.2.2. Umbral de cambio de flujo escalón a escalón a rasante

El umbral de cambio ha sido estudiado ampliamente por diversos investigadores, sin embargo, es difícil establecer una correlación que sirva para todas las pendientes y configuraciones de escalones. Se citan algunos estudios mencionados en Sánchez Juny (2001).

Essery Horner (1978) analizan estructuras con pendientes desde 0.2 a 0.9, con diversas inclinaciones de la propia huella del escalón (desde 0° a 20°). Fig N° 18.

Rajaratnam (1990), analiza los resultados de Essery Horner (1978) y establece:

$$\frac{y_c}{h} > 0.8 \text{ para } \frac{h}{l} = 0.4 \dots 0.9$$

Díez – Cascón (1991) fija un umbral en

$$\frac{y_c}{h} = 0.9 \text{ para } \frac{h}{l} = 1.33$$

Deoutte et al. (1992) determinan, para aliviaderos escalonados formados por gaviones, que el umbral de cambio para:

$$\frac{y_c}{h} = 0.74 \text{ para } \frac{h}{l} = 0.33$$

$$\frac{y_c}{h} = 0.62 \text{ para } \frac{h}{l} = 1.0$$

Chanson (1994a) analiza datos de diversos autores y proporciona los siguientes datos.

Caudales de cambio de régimen obtenidos por los diversos autores, según Chanson (1994a)		
h/l	y _c /h	Autor
0.2	1.2	Essery Horner (1978)
0.42	0.81	
0.53	0.82	
0.74	0.83	
0.84	0.81	
0.33	0.74	
0.5	0.67	Peyras et al. (1992)
1	0.62	Degoutte et al. (1992)
1.25	0.4	Beitz et al (1992)

Tabla. 1.- Caudales de cambio de régimen obtenidos por diversos autores según Chanson (1994)

Fuente: Sanchez Juny (2001)

Haciendo un ajuste por mínimos cuadrados, Chanson propone la siguiente ecuación para determinar el umbral de cambio del flujo escalón a escalón a rasante. (Ecuación N° 12). Límite inferior para la formación de flujo rasante.

$$\frac{y_c}{h} > 1.057 - 0.465 \frac{h}{l}$$

Cabe resaltar que, Chanson (1994a) utiliza datos de Degoutte et al. (1992) donde se obtienen las mediciones de una estructura con gaviones, por lo que, el umbral de cambio resultante podría estar por debajo de los límites.

Posteriormente Chanson (1996) caracteriza hidráulicamente el flujo escalón a escalón, estableciendo relaciones entre las variables consideradas, establece que el umbral de cambio se da cuando la cavidad de aire que se produce entre la contrahuella y la lámina inferior del flujo que cae desaparece. Establece teóricamente que el umbral de cambio se da para $y_c/h > 0.6$ aproximadamente.

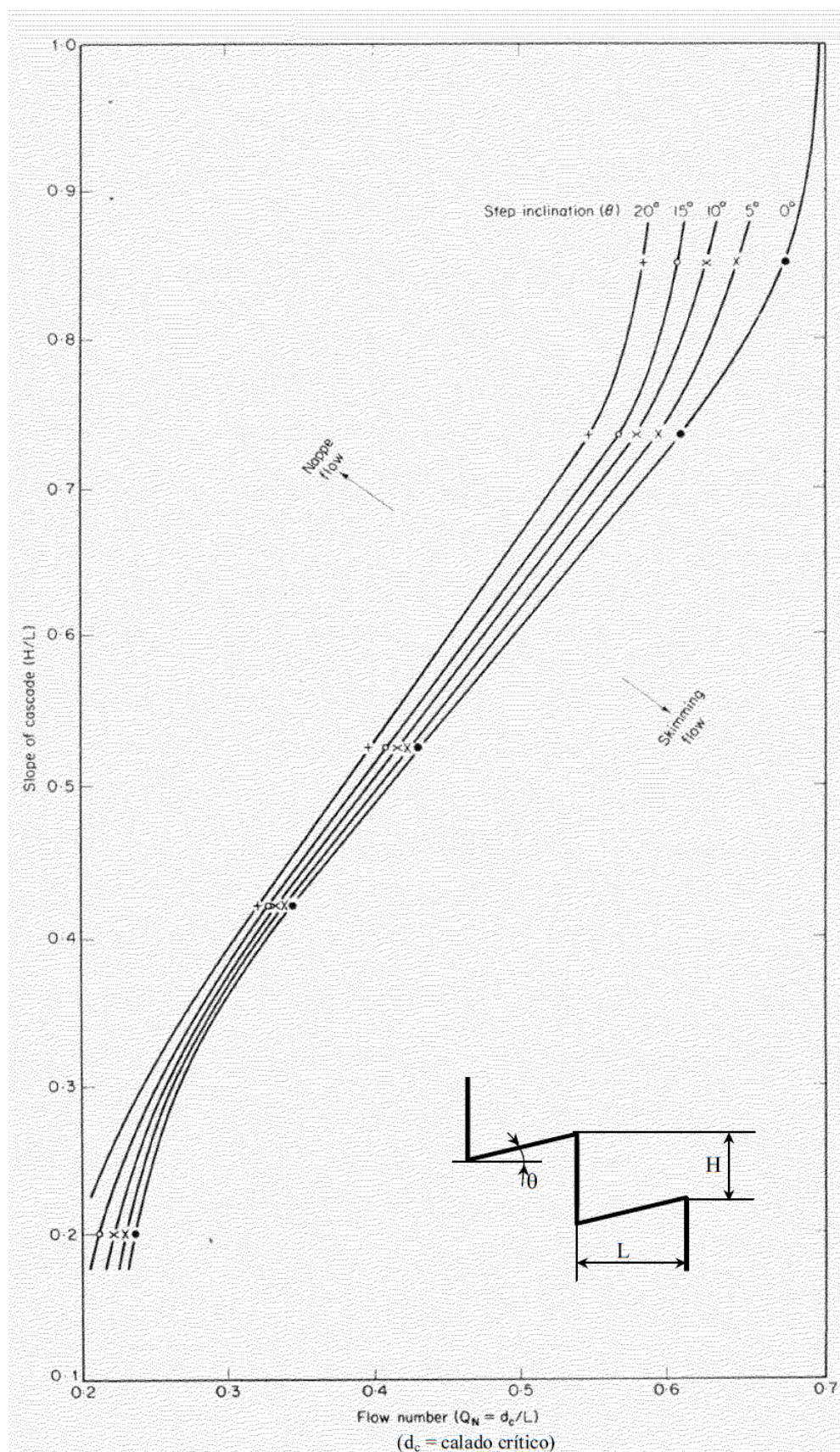


Figura. 18.-Límite del flujo escalón a escalón, para diversas inclinaciones de escalones (Essery Horner 1978).

Fuente: Sánchez Juny (2001)

2.2.3. Aireación sobre un aliviadero escalonado

2.2.3.1. Introducción

En flujos en lámina libre, que presentan altas velocidades, como es el caso de aliviaderos con perfil estricto, tienen la capacidad de introducir gran cantidad de aire captada de la superficie del fluido, el aire atrapado queda inmerso en el flujo, disgregado en burbujas de diferentes tamaños. En la primera parte inmediatamente después de la cresta del aliviadero se observa un flujo de agua cristalina y transparente, conforme el flujo avanza llega a un determinado punto donde el agua se torna de color blanco debido a la presencia de burbujas de aire dentro del fluido. Estas burbujas de aire pueden cambiar de tamaño debido a la unión o disgregación de las mismas.

La entrada de aire se debe a que la macro-rugosidad del escalón ocasiona un aumento del grosor de la capa límite turbulenta en comparación con un aliviadero liso. Fuera de la capa límite el flujo se considera irrotacional (Amador, 2005, p. 91).

Cuando la capa límite alcanza la superficie libre, se produce una inestabilidad en ella que propicia la entrada de aire. Aguas debajo de este punto se inicia un flujo bifásico turbulento mezcla de agua aire. Esto ocurre cuando la energía cinética turbulenta ha superado la tensión superficial y los efectos de la gravedad. (Estrella, 2013, p 13).

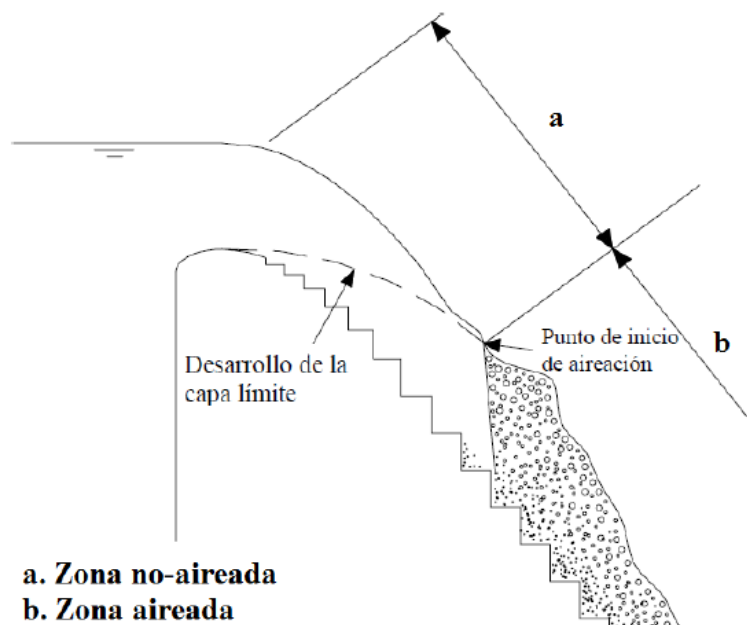


Figura 5. Punto de inicio de aireación.

*Figura. 19.- Punto de inicio de aireación.
Fuente: Estrella 2013*

Estrella (2013) menciona que, con la entrada de aire al fluido se ven afectados diversos factores del comportamiento hidráulico de la estructura

Aumento del tirante, al pasar a ser un fluido compuesto de agua-aire varían propiedades determinantes como la densidad, viscosidad o elasticidad.

- Reducción de las presiones negativas elevadas, debido a la modificación de la estructura turbulenta del flujo a la entrada de aire a presión atmosférica. Esto a su vez reduce el riesgo de cavitación.
- Variación en el campo de velocidades, ya que las burbujas de aire introducen una componente vertical en la cantidad de movimiento debido a la flotación de las mismas.
- Hasta que el agua quede saturada, existe un aumento de los niveles de oxígeno y nitrógeno.

La inestabilidad que produce la capa límite al alcanzar la superficie libre produce la entrada de aire, además de este mecanismo existen otros mencionados por Favley (1980), resumidos a continuación (Sánchez 2001):

- Los cajeros laterales que están en contacto con el flujo, provocan también un crecimiento de la capa límite que favorecerá la entrada de aire. La combinación de este fenómeno con la auto-aireación, adelanta la entrada de aire provocando, en rápidas estrechas, una entrada de aire en forma de U.
- Aguas debajo de las pilas separadoras de los diferentes vanos de este tipo de aliviaderos, se produce entrada de aire.
- La formación de vórtices longitudinales. Cuando éstos intersecan la superficie libre, la depresión que producen favorece la entrada de aire.

Una característica de flujos a alta velocidad en aliviaderos escalonados es el proceso de entrada de aire el cual ha sido estudiado primero en numerosos experimentos en aliviaderos lisos (e.g. STRAUB & ANDERSON 1958; CAIN & WOOD 1981; CHANSON 1988). El proceso de entrada de aire en aliviaderos escalonados es similar, pero debido a la mayor rugosidad, i.e. los escalones, la entrada de aire ocurre mucho antes que en los aliviaderos lisos para canales con pendiente y descarga (caudal) idéntica. (Felder 2013).

2.2.3.2. Punto de inicio de aireación en flujo rasante

El flujo debe presentar ciertas características para generar la perturbación suficiente y producir la captación de aire de la superficie. Como se ha mencionado anteriormente el punto de inicio de aireación de da cuando la capa límite alcanza la superficie libre, lo que provoca que se produzca una inestabilidad en ella que propicia la entrada de aire. Dicho punto depende de las propiedades de del fluido y se caracteriza porque las fuerzas de inercia supera a las fuerzas debidas a la viscosidad y tensión superficial del fluido.

Es importante conocer el punto de inicio de aireación principalmente, a fin de evitar el riego de cavitación.

Existen estudios que han estudiado y propuesto fórmulas para determinar el punto de inicio de aireación. Las ecuaciones planteadas por los diversos autores toman como referencia principal al caudal circulante por el aliviadero. Otros de los factores influyentes en menor escala es la pendiente de la rápida escalonada y de la altura del escalón. Cuanto mayor es la pendiente del aliviadero, más aguas arriba se presentará el punto de inicio de aireación en el aliviadero.

Sanchez (2001) hace referencia al estudio realizado por Keller et al. (1997) el cual analiza el problema en un aliviadero con perfil estándar tipo WES, con el paramento aguas arriba vertical, para un cierto rango de caudales, diferentes pendientes y rugosidad del mismo. Los resultados obtenidos por el mencionado estudio indican que la influencia de la pendiente del aliviadero en la posición del punto crítico, es más importante cuánto más bajas son las pendientes. Ello destaca la influencia de la aceleración de la gravedad en el desarrollo de la capa límite turbulenta. Así mismo relaciona la cercanía del punto crítico a la cresta del aliviadero con el aumento de la rugosidad, a mayor rugosidad se produce un crecimiento de la capa límite turbulenta mucho más acelerado.

Chanson (2004) analiza los datos que proporcionan Sorensen (1958), Frizell et al. (1991), Beitz et al. (1992), Tozzi (1992) y Bindo et al. (1993), cabe resaltar que no todos los datos proporcionados por los autores mencionados son para aliviaderos escalonados. Para incluir el efecto de los escalones tanto en el crecimiento de la capa límite como en la posición del punto crítico, resulta:

$$\frac{\delta}{k_s} = 0.06106 \cdot (\text{sen}\alpha)^{0.133} \cdot \left(\frac{L}{k_s}\right)^{-0.17} \quad [16]$$

$$\frac{L}{k_s} = 9.1719 \cdot (\text{sen}\alpha)^{0.0796} \cdot \left(\frac{q}{\sqrt{g \cdot \text{sen}\alpha \cdot k_s^3}}\right)^{0.713} \quad [17]$$

Donde:

k_s representa la rugosidad del aliviadero, pudiéndose representar como $k_s = h \cdot \cos\alpha$

q es el caudal unitario

g es la aceleración de la gravedad

L es la longitud desde la cresta donde se ubica el punto de inicio de aireación

α el ángulo del aliviadero con respecto a la horizontal.

Amador et al. (2006b), proponen las siguientes fórmulas del punto de inicio de aireación:

$$\frac{L}{k_s} = 5.982 \cdot \left(\frac{q}{\sqrt{g \cdot \text{sen} \alpha \cdot k_s^3}} \right)^{0.840} \quad [18]$$

$$\frac{y_i}{k_s} = 0.383 \cdot \left(\frac{q}{\sqrt{g \cdot \text{sen} \alpha \cdot k_s^3}} \right)^{0.580} \quad [19]$$

La expresión $\frac{q}{\sqrt{g \cdot \text{sen} \alpha \cdot k_s^3}}$ corresponde al número de Fr^*

Meireles et al. (2012) plantean unas expresiones análogas:

$$\frac{L_i}{k_s} = 6.75 \cdot Fr^{*0.760} \quad [20]$$

$$\frac{y_i}{k_s} = 0.35 \cdot Fr^{*0.590} \quad [21]$$

2.2.3.3.Capacidad de transporte de aire

Después del punto de inicio de aireación, el aire que entra en forma de burbujas, y éstas se desplazan en el sentido del flujo del agua, a su vez las burbujas presentan una velocidad ascensional(V_b). Así la capacidad de transporte de aire del flujo se verá determinado por la velocidad del flujo (V) y la velocidad ascensional de las burbujas (V_b).

2.2.4.Distribución de velocidades en el aliviadero

De acuerdo a la bibliografía diferentes autores han determinado experimentalmente que los perfiles de velocidad siguen una ecuación potencial, como sigue:

$$\frac{U_{(y)}}{U_{90}} = \left(\frac{y}{Y_{90}} \right)^{1/N}$$

[22]

Donde N es una constante y U_{90} es la velocidad característica en $y = Y_{90}$. En cuanto al valor de N , diversos autores definen el su valor de 3.9 a 30, cuyo valor está determinado por el caudal específico, el tamaño del escalón y la pendiente del aliviadero.

Sorensen (1985) compara las velocidades de dos aliviaderos, de fondo escalonado y fondo liso. Estimó las velocidades a partir de la ecuación de continuidad midiendo el calado al pie de la rápida. El autor señala la influencia del aire en sus mediciones, por lo que, realizó mediciones adicionales con un tubo de pitot, estas mediciones dieron como resultado variaciones de 10% a 15%.

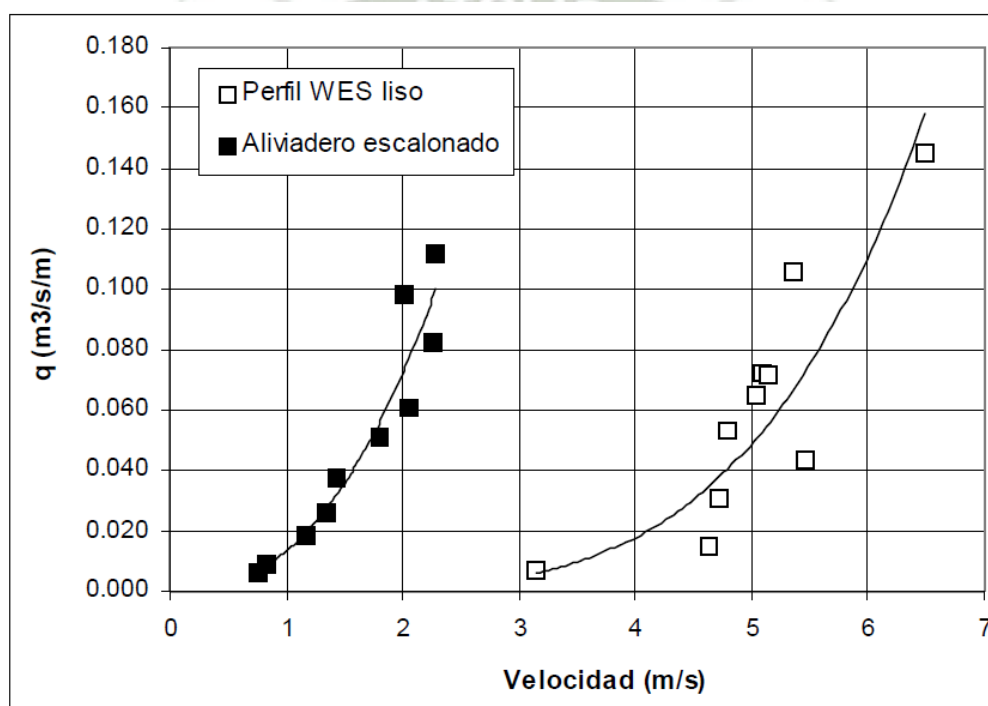


Figura. 20.- Velocidades a pie de aliviadero para un modelo escalonado 1/25 de un prototipo con una pendiente 1v:0.78h, y peldaños de $h=0.61\text{m}$ (puntos blancos) y para uno no escalonado (puntos negros). Resultados a nivel de prototipo. (Sorensen(1984))

Fuente: Sanchez-Juny 2001

En el gráfico se puede observar que la dispersión de datos es mayor en el aliviadero escalonado, la diferencia de velocidades entre el aliviadero liso y el escalonado, es de un tercio, esto debido a la presencia de la macro-rugosidad (escalones), lo que lleva a que se presente menor energía. La diferencia en la energía presente en un aliviadero escalonado se debe a la mayor transferencia de cantidad de movimiento en la dirección normal a la solera, propiciada por los escalones.

2.2.5. Energía disipada en un aliviadero escalonado

La disipación de energía constituye una de las principales ventajas en la construcción de aliviaderos escalonado, es previsible que los escalones confieren una reducción en la velocidad del agua, en comparación con un aliviadero de fondo liso, esto se traduce en una mayor disipación de energía.

Existen factores que condicionan la disipación de energía:

- Caudal
- Rugosidad de forma (K_s), escalonado, depende de la pendiente del aliviadero (α) y la altura del escalón (h).
- La altura del aliviadero (H).

En el flujo rasante la resistencia del flujo se da por el intercambio de cantidad de movimiento entre el flujo delimitado entre las aristas del paso y contrapaso (estos forman un falso fondo) y el flujo que está por encima. Predomina por eso la resistencia de forma ("form drag") por lo que Kazemipour y Apelt (1983), consideran inadecuado utilizar la ecuaciones de Gauckler-Manning o Darcy-Weisbach para calcular este tipo de pérdidas de energía. (Amador, 2005, p. 28)

La mayoría de estudios están basados en el uso de la ecuación de Darcy-Weisbach para calcular el coeficiente de fricción equivalente y la disipación de energía en flujo rasante.

2.2.5.1. Introducción a estudios realizados sobre disipación de energía

Con el fin de encontrar las características más eficientes de aliviaderos escalonados para la disipación de energía, hace más de 50 años se investiga sobre modelos a escala los fenómenos ocurridos en la estructura.

Desde los años 50' se realizan estudios sobre aliviaderos escalonados, Poggi (1949, 1956) dirigieron los primeros estudios basados en el régimen de flujo grada a grada. (Espinosa, Mera. 2007).

Horner (1969) realizó estudios con escalones en contrapendiente para régimen escalón a escalón y rasante en el Reino Unido, posteriormente él mismo junto con Essery (1978) realizaron estudios con el fin de formular diseño hidráulico de aliviaderos.

Stephenson (1979), fue uno de los primeros investigadores en estudiar la disipación de energía en aliviaderos de gaviones, para los regímenes escalón a escalón y rasante. Utilizando modelos de escalas 1:10 y 1:25.

Diez Cascón (1991) estudió el comportamiento hidráulico para flujo rasante en un modelo de escala 1:10.

Posteriormente se empezaron a estudiar fenómenos como entrada de aire y los efectos de escala para extrapolar los datos de modelos hacia prototipos, como la

investigación de Boes (2000) para aliviaderos con pendientes de 30° y 50°. Sánchez Juny (2001), realizó estudios en el campo de presiones en aliviaderos escalonados.

2.2.5.2. Análisis en modelo físico de aliviaderos escalonados

El desarrollo de la tecnología aplicado a la construcción de estructuras con concreto compactado con rodillo, ha traído consigo el estudio de aliviaderos escalonados. Para representar caracterizar el comportamiento de este tipo de estructuras es necesario trabajar con modelos en laboratorio. Estrella (2005) presenta un resumen de los estudios realizados en aliviaderos escalonados (Tabla N°2).

2.2.5.3. Energía disipada a pie de aliviadero

2.2.5.3.1. Energía disipada para Flujo escalón a escalón

Chanson (1994c), propone que la energía en el flujo escalón a escalón obedece a tres efectos:

La emulsión del chorro que sale del escalón superior.

El impacto de este chorro sobre el escalón inferior.

El resalto hidráulico que se desarrollará en éste.

Estima la siguiente expresión que, es función de la presencia de compuertas que controlen la entrada del flujo al aliviadero.

$$PED_{01} = 1 - \frac{0.54 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{0.275} + 1.715 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{-0.55}}{\frac{E_0}{y_c}} \quad [23]$$

Donde,

$$\frac{E_0}{y_c} = \frac{3}{2} + \frac{H}{y_c} \text{ Si la estructura no dispone de compuertas}$$

$$\frac{E_0}{y_c} = \frac{H+H_0}{y_c} \text{ Si la estructura escalonada dispone de compuertas.}$$

donde,

H es la altura de la estructura escalonada desde la cresta hasta el pie

H_0 la sobreelevación de agua en la cresta (lámina de agua encima de la cresta, diseño).

Resumen de la investigación en modelo físico de aliviaderos escalonados.

Referencia	Ángulo con la horizontal (grados)	Escala	Huella h (m)	Caudal Específico	Régimen *	Objeto de estudio	Observaciones
Horner (1969)	22.8 - 40.1	-	0.15 - 0.46	-	E.E. y F. R.	Escalones con contrapendiente	(Reino Unido)
Essery y Horner (1978)	11 - 40	-	0.025 - 0.500	-	E.E. y F. R.	Diseño Hidráulico	(Reino Unido) Ensayos de la CIRIA
Stephenson (1979)	18.4 - 45	-	0.15	-	E.E. y F. R.	Disipación de Energía	(Sudáfrica) Aliviadero de Gaviones
Sorensen (1985)	52	1 :10 1:25	0.061 0.024	0.005-0.235 0.006-0.110	E.E. y F. R.	Aplicación/Diseño	(Estados Unidos) Presa de Monksville
Hollingworth y Druuts (1986)	59	1:20 1:75	0.05 0.01	0.04-0.11 0.005-0.015	E.E. y F. R.	Aplicación/Diseño	(Sudáfrica) Presa de Mist Kraal
Houston (1987)	72 y 59	1:05 1:10 1:15	0.08-0.12	0.2	F.R.	Aplicación/Diseño	(Sudáfrica) Presa Upper Stillwater
Bramley et al. (1989)	33.7	-	0.25	Hasta 0.5	F.R.	Aplicación/Diseño	(Reino Unido) Bloques prefabricados paralelos al paramento de la presa.
Baker (1990)	21.8 33.7	-	0.0096-0.0580	-	F.R.	Aplicación/Diseño	(Reino Unido) Yuxtaposición de bloques prefabricados con forma de cuña inclinados.
Frizell (1990)	53.12	01:12	0.05	0.055-0.345	F.R.	Aplicación/Diseño	(Estados Unidos) Presa Milltown Hill
Diez-Cascón (1991)	53.1	01:10	0.03-0.06	0.022-0.28	F.R.	Comportamiento Hidráulico	(España)
Frizell y Mefford (1991)	26.6	-	0.051	0.077	F.R.	Comportamiento Hidráulico	
Stephenson (1991)	54.5	-	-	-	-	Aplicación/Diseño	(Irán) Aliviadero de Godar-e-landar
Peyras, Royet y Degoutte (1991, 1992)	18.4 26.6 45	01:15	0.2	0.06-0.09	E.E. y F. R.	Disipación de Energía	(Francia) Aliviadero de Gaviones
Beitz y Lawless (1992)	51.3 y 48	02:00	0.02	0.0006-0.093	E.E. y F. R.	Aplicación/Diseño	(Australia) Aliviadero Burton George
Frizell (1992)	26.6		0.051	0.58	F.R.	Rehabilitación	(Estados Unidos)
Tozzi (1992)	53.13	01:15	0.0083 0.0166 0.0333 0.0500 0.1000	0.086-0.0201	F.R.	Comportamiento Hidráulico	(Brasil) Modelo WES con primeros escalones más pequeños
Bindo, Gautier, Lacroix (1993)	51.34	01:21.3 01:42.7	0.038 0.019	0.01-0.142 0.007-0.04	F.R.	Aplicación/Diseño	(Francia) Aliviadero M'Bali
Christodoulou (1993)	55		0.025	0.02-0.09	F.R.	Disipación de Energía	(Grecia)
Montes (1994)	36.8-45	-	0.03	-	E.E. y F. R.	Comportamiento Hidráulico	(Australia)
Ru et al. (1994)	53.13	01:10	0.02 0.04 0.06 0.08	0.003-0.32	E.E. y F. R.	Disipación de Energía	(Singapur)
Ruff y Frizell (1994)	26.6		0.154	2.6	F.R.	Concentración de aire	(Estados Unidos)
Rice y Kadavy (1994, 1997)	21.8	01:20	0.03	0.065-0.162	F.R.	Diseño Hidráulico	(Estados Unidos)
Elviro y Mateos (1995)	45	01:15	-	-	E.E. y F. R.	Disipación de Energía	(Canadá) Aliviadero de gaviones
Gastón (1995)	26.6	-	0.064	0.31-3.0	F.R.	Aireación y disipación de energía	(Estados Unidos)
Zhou (1996)	53.1	-	0.04	0.012-0.189	F.R.	Comportamiento Hidráulico	(Malasia)
Chanson y Toombes (1997)	4	-	0.168	0.04-0.16	E.E.	Comportamiento Hidráulico	(Australia)
Mateos y Elviro (1997)	51.3-71.6	1:6 a 1:25	0.9 1.2	-	F.R.	Comportamiento Hidráulico	(España)
Matos y Frizell (1997)	53.1	1:75 a 1:11	0.08	0.05-0.20	F.R.	Concentración de aire	(Estados Unidos)
Frizell y Hanna (1997)	48	01:10	0.06	0.02-0.10		Aplicación/Diseño	(Estados Unidos) Presa pilar

Resumen de la investigación en modelo físico de aliviaderos escalonados.

Referencia	Ángulo con la horizontal (grados)	Escala	Huella h (m)	Caudal Específico	Régimen *	Objeto de estudio	Observaciones
Tozzi et al. (1998)	52.2	01:15	0.053	0.23	F.R.	Concentración de aire	(Brasil)
Yildiz y Kas (1998)	30 51.3 60	-	0.025 0.076	0.04-0.24	F.R.	Comportamiento Hidráulico	(Turquía)
Boes y Hager (1998)	30	-	0.02-0.09	0.36	F.R.	Flujo bifásico	(Suiza)
Boes (1998)	30 40 50	-	0.02- 0.09	0.006-0.09	F.R.	Comportamiento Hidráulico	(Suiza)
Bramley et al. (1998)	33.7	-	0.25	0.5	F.R.	Aplicación/Diseño	(Reino Unido)
Pegram (1999)	59	1:10 1:20	0.025 0.083 0.141 0.200	0.12 0.24	E.E., F.T y F.R.	Comportamiento Hidráulico	(Sudáfrica)
Shvainsnshtein (1999)	38.7 51.3	-	0.05 0.0625	0.08-0.2 0.08-0.2	F.R.	Disipación de Energía	(Rusia)
Chamani y Rajaratman (1999)	59 51.3	-	0.313 0.625 0.125	0.073-0.205	F.R.	Comportamiento Hidráulico	(Irán)
Yasuda y Ohtsu (1999)	5.7 11.3 19 30 55	-	0.006-0.010 0.06-0.010 0.002-0.08 0.004-0.007 0.003-0.064	0.008-0.080 0.008-0.089	F.R.	Resistencia al flujo	(Japón)
Ahmann y Zapel (2000)	45 26.6 18.4	01:08	0.075	0.037-0.108	E.E., F.T y F.R.	Concentración de Aire	(Estados Unidos)
Boes (2000)	30 50	-	0.023 0.046 0.092 0.031 0.093		F.R.	Efectos de escala	(Suiza)
Matos (2000)	53.1	-	0.08	0.08-0.2	F.R.	Diseño Hidráulico	(Portugal)
Matos, Sánchez Juny y Dolz (2000)	51.34	-	0.1 0.07 0.05	0.33		Entrada de aire	(España)
Chanson y Tombes (2000)	3.2	-	0.0143	0.04-0.15	E.E.	Entrada de aire	(Australia)
	3.4		0.0143	0.04-0.17	E.E.		
	3.4		0.071	0.04-0.17	F.T.yF.R		
	21.8		0.1	0.005-0.5	E.E.,F.T.yF.R.		
Pinheiro y Fael (2000)	14	-	0.05	0.057	E.E.	Comportamiento Hidráulico	(Brasil)
	18.4						
Fratino et al. (2000)	25.6	-	0.025	0.005	E.E.,F.T.yF.R.	Disipación de Energía	(Italia)
	13.5						
	6.8						
Peruginelli y Pagliara (2000)	26.6	-	0.08	0.009-0.19	E.E.,F.T.yF.R.	Disipación de Energía	(Italia)
Sánchez Juny (2001)	51.3	-	0.01	0.083-0.33	F.R.	Campo de presiones	(España)
Manso (2002)	18.4	01:10	-	0.326	F.R.	Aplicación/Diseño	(Suiza) Estudi de estabilidad de elementos de protección de presas.
Chanson (2000)	21.8	-	0.1	0.04-0.18	F.T.yF.R	Comportamiento Hidráulico	(Australia)

Resumen de la investigación en modelo físico de aliviaderos escalonados.

Referencia	Ángulo con la horizontal (grados)	Escala	Huella h (m)	Caudal Específico	Régimen *	Objeto de estudio	Observaciones
André et al. (2003)	30 18.5	1:5 a 1:10	0.06	<0.28	E.E.,F.T.yF.R.	Disipación de Energía	
André (2004)	30	-	0.06	<0.28	F.R.	Comportamiento Hidráulico	(Suiza) Estudio de distintos sistemas de protección de paramento en presas.
Gonzales y Chanson (2004)	15.9 21.8	-	0.05 1.00	0.02-0.2	E.EyF.R.	Diseño Hidráulico	(Suiza)
Amador (2005)	51.3	-	0.07	<0.33	E.EyF.R.	Comportamiento Hidráulico	(España)
			0.05	<0.11	E.EyF.R.		
Tombes y Chanson (2008)	3.4	-	0.143	0.038-0.163	E.E.	Estudio de flujo escalón a escalón en aliviaderos de bajas pendientes	(Australia)
Hunt (2008)	18.4	22	0.014	0.07	F.R.	Cajeros convergentes (0, 15, 30, 52°)	(Estados Unidos)
Meireles y Matos (2009)	26.6	-	0.025 0.050	0.03-0.08	F.R.	Comportamiento Hidráulico zona no aireada	(Portugal)
Felder y Chanson (2009)	21.8	-	0.05	0.044-0.196	F.R.	Disipación de Energía. Turbulencia y efectos de escala	(Australia)
Roshan (2010)	10.98	20	0.0325 0.0650	0.0126-0.181	E.E.,F.T.yF.R.	Efecto del número de escalones de la disipación de energía	(Irán)
Felder y Chanson (2011)	26.6	-	0.05 0.10	0.02-0.237	E.E.,F.T.yF.R.	Efecto en la disipación de energía de tamaños de escalón no uniformes**	(Australia)
Relvas y Pinheiro (2012)	21.8	2.5	0.016 0.040	0.361	F.T.yF.R	Distribución de la velocidad (escalones prefabricados de concreto)	(Portugal)
Meireles et al. (2012)	53.13		0.02 0.04 0.08	0.05-0.2	E.E.,F.T.yF.R.	Comportamiento Hidráulico zona no aireada	(Portugal)
Estrella (2013)	51.34	1:15	0.08	0.258	E.E.,F.T.yF.R.	Comportamiento hidráulico de aliviaderos sin cajeros laterales	(España)
Estudios en prototipo o cercano a prototipo.							
Grinkchuk et al. (1997)	8.7	1:1	0.4	1.8-60	F.R.	Efectos de escala	(Ucrania)
Frizell y Ruff (1994)	26.6	1:1	0.064	0.26-2.95	F.R.	Efectos de escala	(Estados Unidos)
Gaston (1995)	26.6	1:1	0.064	0.003-0.3	E.E. y F.R.	Efectos de escala	(Estados Unidos)
Baker (1995)	18.4	1:1	0.125	0.7-2.0	F.R.	Efectos de escala	(Reino Unido)
Gonzales y Chanson (2004)	15.9	1:2	0.10 0.05	0.06-0.08	F.T. y F.R.	Efectos de escala	(Australia)
Gonzales y Chanson (2004)	3.4	1:2	0.15	0.75-0.22	T.F.	Efectos de escala	(Australia)
				0.02-0.08			

Tabla. 2.- Resumen de la investigación en modelo físico de aliviaderos escalonados
Fuente: Estrella 2013, Pág 5

2.2.5.3.2. Energía disipada para Flujo Rasante

Chanson (1994) Asumiendo que llega a formarse flujo uniforme

$$PED_{01} = 1 - \frac{\left(\frac{f}{8 \operatorname{sen} \alpha}\right)^{1/3} \cos \alpha + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \operatorname{sen} \alpha}\right)^{-2/3}}{E_0} \quad [24]$$

Donde,

$$E_0 = \frac{3}{2} + \frac{H}{y_c} \text{ Si la estructura no dispone de compuertas}$$

$$E_0 = \frac{H+H_0}{y_c} \text{ Si la estructura escalonada dispone de compuertas.}$$

donde,

H es la altura de la estructura escalonada desde la cresta hasta el pie

H_0 la sobreelevación de agua en la cresta (lámina de agua encima de la cresta, diseño).

2.2.5.3.2.1. Coeficiente de fricción equivalente

Los escalones del aliviadero producen un aumento de la rugosidad, lo que se traduce en la disminución de la velocidad del flujo, por lo tanto, disminución de la energía. Rajaratman (1990), propone que el coeficiente de fricción se puede calcular con:

$$f = \frac{8 \cdot g \cdot y_p \cdot \operatorname{sen} \alpha}{V^2} \quad [25]$$

Donde,

f es el coeficiente de Darcy – Weibach

g es la gravedad

y_p es la profundidad del agua (tirante) en la dirección perpendicular a la pendiente del aliviadero, en la zona de flujo completamente desarrollado.

V es la velocidad media del flujo, promediada en todo el calado.

CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS DIMENSIONAL Y MODELADO

3.1.1. Introducción

Los modelos hidráulicos representan la herramienta más confiable hoy en día para analizar el comportamiento de estructuras y su entorno, cuando los avances en métodos analíticos y matemáticos no están desarrollados o no existen.

La necesidad que tiene el hombre de entender los fenómenos de la naturaleza le lleva a plantearse métodos experimentales para su reproducción, los modelos hidráulicos permiten representar problemas donde no existen métodos matemáticos o analíticos confiables.

Al diseñar una estructura se debe resolver la problemática de correlacionar tres aspectos importantes eficiencia, seguridad y costo, para ello es importante conocer el comportamiento y los diversos factores que afectaran a dicha estructura.

Actualmente casi todas las obras hidráulicas, como presas, puertos y obras fluviales y marítimas requieren estudios en modelo que permitan al diseñador probar su funcionamiento, detectar problemas y hacer cambios necesarios antes de empezar las obras. En los modelos hidráulicos se pueden detectar fallos y hacer mejoras haciendo cambios en el diseño, todo ello sin incurrir en grandes sumas de dinero que implicaría hacer dichos cambios una vez puesta en marcha la ejecución de las estructuras, a su vez una gran ventaja de los modelos es que permite tener una perspectiva mucho más amplia de las estructuras no solo al diseñador y al constructor, sino que a cualquier observador interesado en utilizar la experiencia posteriormente. (Echávez, 1996, p. 1)

En la antigüedad se han realizado estudios de ciertos fenómenos hidráulicos mediante representaciones de estructuras y máquinas, con las cuales se llegaron a enunciar principios fundamentales de la hidráulica, sin embargo, éstas no pasaban de ser maquetas, debido a que, no se conocían las leyes de similitud. No es sino hasta el siglo XX que, Galileo Galilei en su obra "Diálogos acerca de dos ciencias nuevas" (1938), introduce los conceptos de escala y la diferencia de proporción tamaño de los objetos con su peso, resistencia, vigor, etc. Galileo puso como ejemplo un hueso de un hombre de tamaño normal, cuyo largo natural se triplicó y el grosor se multiplicó, tal que pueda desempeñar la misma función en un gigante. En la imagen dibujada por galileo (Figura N° 21), se aprecia claramente la desproporción que existe en el hueso de mayor tamaño con respecto al hueso de tamaño normal.

Resulta evidente la desproporción que existe entre el largo y grosor en la, por lo tanto, es necesario que el hueso grande esté constituido por un material más

resistente y fuerte a fin de conservar la misma proporción de largo y grosor que se presenta en el hueso de tamaño normal.

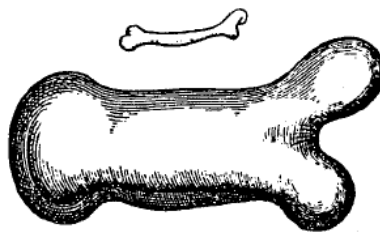


Figura 1.1 Dibujo de Galileo.

Figura. 21.- Figura de Galileo acerca del tamaño a escala de un hueso humano.

Fuente: Introducción a modelos hidráulicos, Echávez G., Pag 2

3.1.2. Clases de modelos

3.1.2.1. Modelos matemáticos

Se define como el conjunto de hipótesis y relaciones de variables que describen un fenómeno, constituyen un modelo matemático (ecuaciones), que conduce a un problema matemático que es necesario resolver mediante apropiadas técnicas matemáticas. (Vergara, 1993, p. 4)

Algunas de las ecuaciones que describen fenómenos físicos se resuelven haciendo uso de ecuaciones diferenciales y con condiciones iniciales de borde, haciendo que su resolución analítica sea imposible de hacer, por lo que, se trabajan mediante un ordenador, los métodos aproximados más utilizados en la actualidad son el de elementos finitos y el de diferencias finitas. El primero transformando un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, utilizando por lo común una red de triángulos, mientras que el segundo utiliza una red de rectángulos, que es menos complicada, y proporciona una descripción suficiente de los contornos.

La precisión de los modelos matemáticos está íntimamente ligada a su costo de explotación, por lo que deben tomarse en cuenta la exactitud de los datos iniciales, el tipo de fenómeno a estudiar la exactitud de las ecuaciones que rigen el fenómeno, la forma de aproximar ecuaciones y la evolución del modelo.

Vergara (1993), describe la secuencia del proceso de desarrollo de un modelo matemático, el mismo que consta de seis etapas y que a continuación se describen.

En la primera etapa se hace una descripción del fenómeno, planteándose las variables que intervienen y las hipótesis del comportamiento del mismo. En la segunda etapa se plantean las ecuaciones diferenciales o integrales que describen

matemáticamente el fenómeno (modelo matemático), asimismo las condiciones de frontera y la variabilidad de solución. La tercera etapa consiste en seleccionar el método de solución del modelo matemático, es decir, la elección del algoritmo de cálculo. En la cuarta etapa se elabora la programación del algoritmo de cálculo para la computadora. La calibración, verificación y validación del modelo corresponden a la quinta etapa; y, por último, la sexta etapa corresponde a la explotación del modelo, es decir, la utilización del mismo con base en datos de campo, de experimentos de laboratorio o de supuestos para obtener predicciones.

3.1.2.2. Modelos Analógicos

Este tipo de modelos aprovecha las similitudes formales que existen entre dos fenómenos físicos cualesquiera para simular a partir de uno de ellos el otro. Las relaciones matemáticas (ecuaciones) que explican el comportamiento entre ambos fenómenos son idénticas, aun cuando los símbolos de cada una de ellas tengan significado diferente. Estas relaciones, normalmente, se expresan en forma de ecuaciones diferenciales que generalmente se basan en algún principio de conservación (masa, energía, etc.). Es común que uno de los dos fenómenos sea de menor dificultad, por lo que éste se emplea para resolver el otro. Los fenómenos análogos más comunes son:

- Analogía entre un flujo a través de medios permeables y flujo laminar en capas delgadas (modelos de Hele-Shaw).
- Analogía entre un flujo laminar y un flujo turbulento.
- Analogía entre un flujo a través de medios permeables y la deformación de una placa elástica bajo carga.
- Analogía eléctrica y otros fenómenos físicos.

3.1.3. Modelos físicos reducidos

Es el uso de modelos físicos a una escala reducida, llamados simplemente modelos hidráulicos. Es una simulación física de un fenómeno hidráulico, implica que estos deben cumplir con las leyes de similitud Geométrica, Cinemática y Dinámica (Descritos en el punto 3.3.4 Análisis dimensional y similitud), que en conjunto relacionan las magnitudes físicas homólogas definidas entre ambos sistemas, el prototipo A_p y el modelo A_m .

3.1.4. Análisis Dimensional y Similitud

3.1.4.1. Dimensiones y unidades

Las dimensiones son una medida de una cantidad física que especifica o describe el comportamiento o naturaleza de un sistema o partícula, mientras que la unidad es una cantidad estandarizada de una determinada magnitud física, que asigna un número a las dimensiones. Existen siete dimensiones primarias: masa, longitud, tiempo, temperatura, corriente eléctrica, cantidad de luz y cantidad de materia. Todas

las dimensiones no-primarias se pueden formar por la combinación de las dimensiones primarias.

Todas las unidades tienen un símbolo asociado que las representa, este se ubica a la derecha de un número que expresa cuantas veces dicha cantidad se encuentra representada.

3.1.4.2.Homogeneidad Dimensional

Las cantidades de una magnitud son comparables entre sí, lo que permite establecer relaciones de igualdad y suma. En cualquier ecuación todos los términos aditivos han de representar la medida de cantidades físicas (dimensión) seguida de una unidad igual en cada término. Si en alguna etapa de un análisis se encuentra que dos términos aditivos en una ecuación tienen diferentes dimensiones, esto sería una señal que se ha cometido un error en alguna etapa anterior.

El principio de homogeneidad dimensional, establece que, cualquier ecuación deducida analíticamente y que represente un fenómeno físico debe satisfacerse en cualquier sistema de unidades.

3.1.4.3.Eliminación de dimensiones de las ecuaciones

La ley de homogeneidad dimensional garantiza que todo término aditivo en una ecuación posee las mismas dimensiones, por lo que, si dividimos a cada término de la ecuación por las dimensiones que cada uno de sus términos posee la ecuación quedará sin dimensiones. Este procedimiento tiene ventajas, primero aumenta la comprensión de las relaciones entre los parámetros clave y reduce el número de parámetros presentes en la ecuación original, resultando mucho más fácil la interpretación del comportamiento del fenómeno estudiado. Adicionalmente otra gran ventaja es que la extrapolación de valores que no se han puesto a prueba de uno o más parámetros dimensionales es posible.

3.1.4.4.Análisis Dimensional y Similitud

Eliminar Dimensiones de una ecuación por medio de análisis de inspección es útil cuando uno sabe con cuál ecuación comenzar. Sin embargo, en muchos casos de la ingeniería de la vida real, las ecuaciones no se conocen o son demasiado difíciles de resolver; la mayoría de las veces la experimentación es el único método para obtener información confiable.

El análisis dimensional es una técnica mediante la cual se analizan las dimensiones de fenómenos físicos para extraer información, mediante la generación de parámetros adimensionales que ayuden en el diseño de experimentos (físicos y/o numéricos) en el reporte de los resultados experimentales.

Se obtienen leyes de escalamiento de modo que se pueda predecir el desempeño del prototipo a partir del desempeño del modelo.

Permite reducir el número de variables en un determinado problema, simplificándolo en forma importante, ya que la información crece geoméricamente con cada variable.

Un principio que subyace en el análisis dimensional es la similitud. Para asegurar la similitud completa entre un modelo y prototipo se deben cumplir tres condiciones: Similitud geométrica, similitud cinemática y similitud dinámica.

3.1.4.4.1. Similitud Geométrica

En la figura N°22 se observa cada rayo de proyección que sale de una fuente hacia un centro homólogo, interseca puntos de ambos sistemas denominados puntos homólogos, sobre los cuales se definen otras magnitudes, tales como: velocidad, presión, etc. De igual manera se definen lados, superficies y volúmenes homólogos, que a su vez constituyen la similitud geométrica, la misma que implica una relación constante, que para cualquier longitud L resulte ser $L_p/L_m = E_L$, llamada escala de líneas o de longitudes. Es decir, para cumplir con la similitud geométrica el modelo debe tener la misma forma que el prototipo, pero se puede escalar por algún factor de escala constante. Los subíndices p y m se refieren al prototipo y modelo, respectivamente.

3.1.4.4.2. Similitud Cinemática

La similitud cinemática se logra cuando se cumple la similitud geométrica, la forma de los patrones de flujo homólogos deben ser iguales en cualquier tiempo, debe existir similitud de movimiento de los sistemas. La velocidad en cualquier punto del flujo del modelo debe ser proporcional a la velocidad correspondiente en el flujo del prototipo, lo que significa que se considera como equivalencia de escala de tiempo.

Se debe tener en cuenta que tanto el factor de escala geométrica y cinemática pueden ser menores, iguales o mayores que uno, por ejemplo, el modelo podría tener una escala menor que el prototipo, sin embargo, en el modelo se podrían presentar valores de velocidad mayores a las que se presentan en el prototipo

En el movimiento del fluido en el modelo y en el prototipo, para que sea similar en forma completa, no es suficiente que cumpla con las similitudes geométrica y cinemática, también es necesario tomar en consideración la acción de las fuerzas sobre las partículas del fluido, tales como Fricción, Tensión Superficial, de Gravedad, de Inercia, de Coriolis, etc.

3.1.4.4.3. Similitud Dinámica

La similitud dinámica se logra cuando las fuerzas ejercidas por el fluido en puntos homólogos del modelo y prototipo se escalan por un factor constante. El cumplimiento de la semejanza dinámica implica previamente semejanza geométrica y cinemática, motivo por el cual, muchos autores indican que entre el modelo y prototipo existe semejanza cuando cumplen con la semejanza dinámica.

Para que se cumpla el criterio de similitud dinámica se deben cumplir la misma relación o escala entre el modelo y prototipo de las fuerzas dinámicas: inerciales, internas, gravitacionales, elásticas, viscosas, etc.

Es físicamente imposible cumplir con la similitud dinámica total, es posible identificar las fuerzas más importantes que condicionan el fenómeno hidráulico en el prototipo y representarlo en el modelo a través de parámetros adimensionales que representan a dichas fuerzas, tales como, el número de Froude (Fr), número de Reynolds (Re), número de Weber (W) o número de Mach (Ma). Se utiliza la letra griega mayúscula pi (π) para denotar un parámetro adimensional.

En un problema general de análisis dimensional, existe una π que se llama π dependiente, a la que se le da la notación π_1 . El parámetro π_1 , es en general, una función de otras varias π , que se llaman π independientes. La relación funcional es:

Relación funcional entre π :

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_k) \quad [26]$$

Donde k es el número total de π .

Considere un experimento en el que un modelo a escala se pone a prueba para simular un flujo de prototipo. Para garantizar la similitud completa entre el modelo y el prototipo, cada π independiente del modelo (subíndice m) debe ser idéntico a la correspondiente independiente del prototipo (subíndice p); es decir: $\pi_{2,m} = \pi_{2,p}$, $\pi_{3,m} = \pi_{3,p}$, ..., $\pi_{k,m} = \pi_{k,p}$

Para garantizar similitud completa, el modelo y el prototipo deben ser geoméricamente similares, y todos los grupos π independientes deben coincidir entre modelo y prototipo.

En estas condiciones, se garantiza que la π dependiente del modelo ($\pi_{1,m}$) se iguale también con la π dependiente del prototipo ($\pi_{1,p}$). Matemáticamente, se escribe un enunciado condicional para lograr similitud,

Si $\pi_{2,m} = \pi_{2,p}$ y $\pi_{3,m} = \pi_{3,p}$, ... y $\pi_{k,m} = \pi_{k,p}$

$$\pi_{1,m} = \pi_{1,p}$$

[27]

Las magnitudes físicas se clasifican en dos grupos: las básicas o fundamentales y las derivadas o secundarias, del primer grupo son longitud (L), masa (M), tiempo (T). Las del segundo son área (A), volumen (V), velocidad (v), gasto (Q), fuerza (F), o cualquier otra (X) en función de las primeras, es decir,

$$[X] = f(L, M, T) \text{ ó } [X] = [L^{x_1} M^{x_2} T^{x_3}]$$

Siendo $x_i (i = 1, 2, 3)$ la dimensión de la magnitud fundamental respectiva.

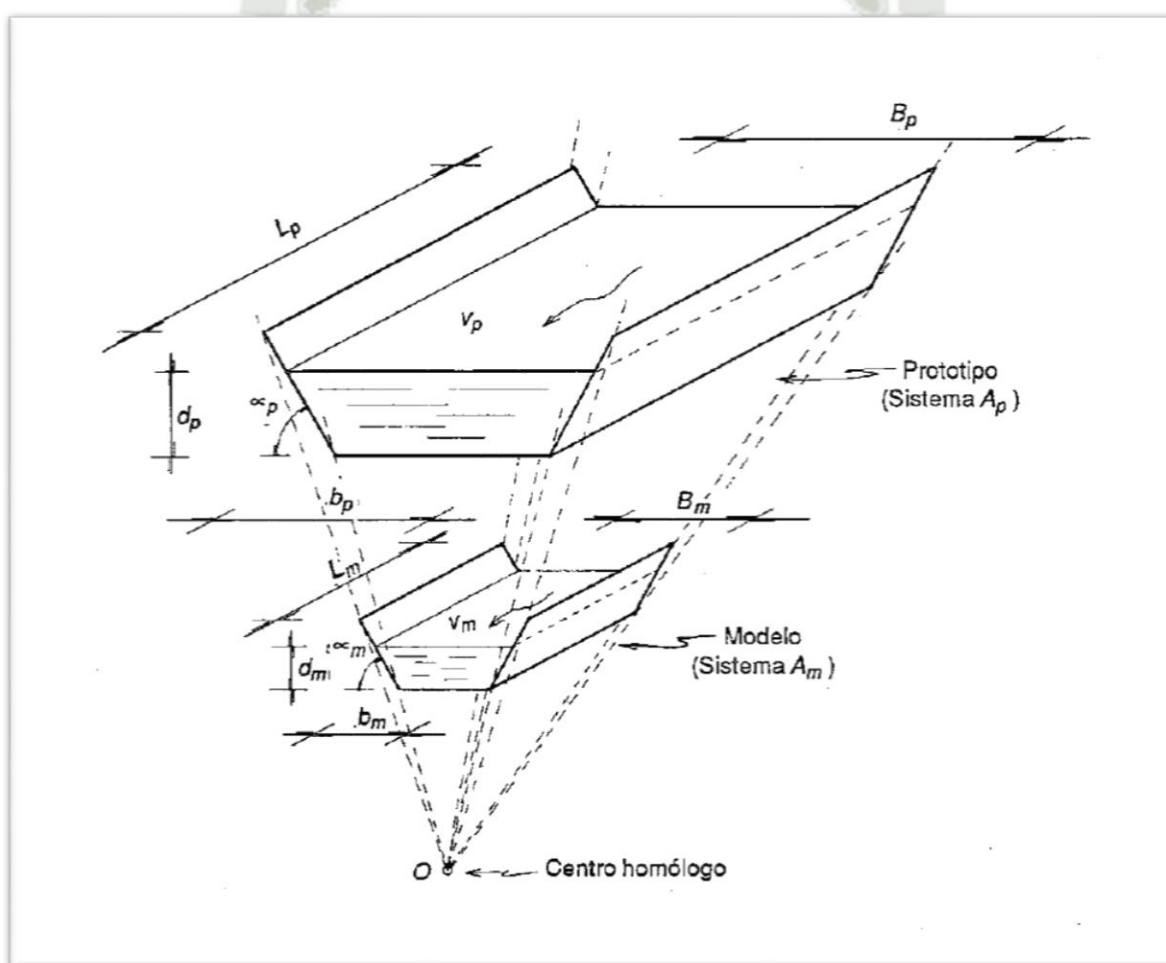


Figura. 22.- Proyección lineal del sistema modelo-prototipo
Fuente: Técnicas de modelación en hidráulica, Vergara S. (1993) pág. 8

3.1.4.5. Teorema Pi Buckingham

O método de repetición de variables. Generar parámetros adimensionales, es decir: las π , es una forma sencilla de entender los fenómenos de flujo de fluidos.

Existen varios métodos para este propósito, pero el método más popular (y más simple) es el método de repetición de variables, popularizado por Edgar Buckingham (1867-1940). El método lo publicó por primera vez el científico ruso Dimitri Riabouchinsky (1882-1962) en 1991.

Cuando en un fenómeno físico intervienen “m” variables, definidas de la forma: $A_1, A_2, A_3, A_4, \dots, A_m$, donde cada una de ellas son dependientes de n magnitudes fundamentales, definidas de la forma: $B_1, B_2, B_3, B_4, \dots, B_n$.

Se tiene una función que relaciona m variables A_i , la función homogénea

$$f(A_1, A_2, A_3, A_4, \dots, A_m) = 0 \quad [28]$$

Y r es el rango de la matriz de exponentes de las A_i , Podrá expresarse como otra función también homogénea.

$$f(\pi) = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \dots, \pi_{m-n}) = 0 \quad [29]$$

Donde las π serán productos adimensionales y se definen como un producto de la forma:

$$\pi = A_1^{x_{1i}}, A_2^{x_{2i}}, A_3^{x_{3i}}, \dots, A_m^{x_{mi}} \quad [30]$$

La ecuación dimensional de π_i es

$$[\pi] = [A_1^{x_{1i}}, A_2^{x_{2i}}, A_3^{x_{3i}}, \dots, A_m^{x_{mi}}]$$

o

$$[\pi] = [A_1]^{x_{1i}}, [A_2]^{x_{2i}}, [A_3]^{x_{3i}}, \dots, [A_m]^{x_{mi}}$$

[31]

Sustituyendo las ecuaciones dimensionales de cada variable A_i , que son función de las magnitudes, $B_1, B_2, B_3, B_4, \dots, B_n$, se tendrá:

$$[\pi_i] = [B_1^{y_{11}} B_2^{y_{21}} B_3^{y_{31}} \dots B_n^{y_{n1}}]^{x_{1i}} \dots [B_1^{y_{1m}} B_2^{y_{2m}} B_3^{y_{3m}} \dots B_n^{y_{nm}}]^{x_{mi}}$$

Ordenando los exponentes de B, se obtiene

$$[\pi_i] = [B_1]^{y_{11}x_{1i} + \dots + y_{1m}x_{mi}} \cdot [B_2]^{y_{21}x_{1i} + \dots + y_{2m}x_{mi}} \cdot [B_3]^{y_{31}x_{1i} + \dots + y_{3m}x_{mi}} \cdot [B_n]^{y_{n1}x_{1i} + \dots + y_{nm}x_{mi}} \quad [32]$$

Como la condición para que π_i sea adimensional es que los exponentes de cada B sean iguales a cero, entonces:

$$\begin{aligned} \text{Para } B_1; y_{11}x_{1i} + \dots + y_{1m}x_{mi} &= 0 \\ \text{Para } B_2; y_{21}x_{1i} + \dots + y_{2m}x_{mi} &= 0 \\ \text{Para } B_3; y_{31}x_{1i} + \dots + y_{3m}x_{mi} &= 0 \\ \text{Para } B_n; y_{n1}x_{1i} + \dots + y_{nm}x_{mi} &= 0 \end{aligned} \quad [33]$$

De este sistema de ecuaciones dimensionales se observa que las únicas incógnitas son las “x”, dado que las “y” son las dimensiones de las magnitudes fundamentales y, por tanto, conocidas.

Del sistema anterior de ecuaciones puede ocurrir que m sea menor que n , entonces el sistema estará determinado o compatible, caso contrario será indeterminado o incompatible, siendo de grado de incompatibilidad $m - n$, lo que significa que para resolver dicho sistema habrá que proporcionar valores arbitrarios a $m-n$ incógnitas.

3.1.4.6. Aplicación del teorema de Pi Buckingham

Disipación de Energía

Selección de variables: El comportamiento del flujo está determinado por la geometría del contorno, los parámetros característicos del flujo y las propiedades físicas del agua y aire.

Las magnitudes seleccionadas para el aliviadero escalonado se detallan en la tabla a continuación (tabla N°3)

Magnitudes físicas			Símbolo
Geométricas	1	Energía disipada	$\frac{\Delta E}{E_o}$
	2	Ancho interior del canal hidrodinámico	b
	3	Altura del aliviadero	H_{dam}
	4	Altura de escalón	h
	5	Longitud de escalón	l
	6	Tirante crítico	y_c
	7	Carga de presión	p

Magnitudes físicas			Símbolo
	8	Rugosidad promedio	ε
	9	Pendiente	α
Cinemáticas	10	Velocidad media	v_m
	11	Gravedad	g
Dinámicas	12	Presión	P
	13	Viscosidad dinámica	μ
	14	Tensión superficial	σ
	15	Densidad	ρ

Tabla. 3.-Magnitudes físicas (modelación hidráulica) ^{PA}

Con las variables seleccionadas se expresa siguiente ecuación que describe funcionalmente la disipación de energía en el aliviadero escalonado en flujo rasante.

$$f\left(\frac{\Delta E}{E_o}, B, H_{dam}, h, l, y_c, p, \alpha, v_m, g, P, \mu, \sigma, \rho\right) = 0 \quad [34]$$

$$\frac{\Delta E}{E_o} = f(b, H_{dam}, h, l, y_c, p, \varepsilon, \alpha, v_m, g, P, \mu, \sigma, \rho) \quad [35]$$

Dimensiones	Variables													
	b	H _{dam}	h	l	y _c	p	α	v _m	g	P	γ	μ	σ	ρ
[M]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
[L]	1	1	1	1	1	1	0	1	1	-1	-2	-1	0	-3
[T]	0	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-2	-2	-1	-2	0

Como podemos apreciar se tienen 15 variables donde una de ellas, la energía residual E_r , depende de las otras 14.

Número de variables: $n = 15$

Número de variables fundamentales: $k = 3$

Número de grupos adimensionales: $j = n - k = 12$

Se podrían formar 12 grupos adimensionales, se escogen 3 variables fundamentales:

Densidad de agua: $(\rho)[M]$

Altura de escalón: $(h)[L]$

Velocidad media del agua (v_m) [T]

Variable	Símbolo	Dimensiones
Densidad	ρ	$[ML^{-3}]$

Altura de escalón	h	$[L]$
Velocidad media	v_m	$[LT^{-1}]$

Determinación de grupos adimensionales

Dimensiones adimensionales formadas por si solas:

$$\pi_1 = \frac{\Delta E}{E_o} \quad [36]$$

$$\pi_9 = \alpha \quad [37]$$

Segundo parámetro adimensional

$$\pi_2 = b \rho^a h^b v_m^c = [L][ML^{-3}]^a [L]^b [LT^{-1}]^c = M^a L^{1-3a+b+c} T^{-c}$$

$$a = 01 - 3a + b + c = 0 - c = 0$$

$$1 + b = 0$$

$$b = -1$$

$$\pi_2 = b \rho^0 h^{-1} v_m^0$$

$$\pi_2 = \frac{b}{h}$$

[38]

Tercer parámetro adimensional

$$\pi_3 = H_{dam} \rho^a h^b v_m^c = [L][ML^{-3}]^a [L]^b [LT^{-1}]^c = M^a L^{1-3a+b+c} T^{-c}$$

$$a = 01 - 3a + b + c = 0 - c = 0$$

$$1 + b = 0$$

$$b = -1$$

$$\pi_3 = H_{dam} \rho^0 h^{-1} v_m^0$$

$$\pi_3 = \frac{H_{dam}}{h}$$

[39]

Quinto parámetro adimensional

$$\pi_5 = l \rho^a h^b v_m^c = [L][ML^{-3}]^a [L]^b [LT^{-1}]^c = M^a L^{1-3a+b+c} T^{-c}$$

$$a = 01 - 3a + b + c = 0 - c = 0$$

$$1 + b = 0$$

$$b = -1$$

$$\pi_5 = l \rho^0 h^{-1} v_m^0$$

$$\pi_5 = \frac{l}{h} \quad [40]$$

Sexto parámetro adimensional

$$\pi_6 = y_c \rho^a h^b v_m^c = [L][ML^{-3}]^a [L]^b [LT^{-1}]^c = M^a L^{1-3a+b+c} T^{-c}$$

$$a = 01 - 3a + b + c = 0 - c = 0$$

$$1 + b = 0$$

$$b = -1$$

$$\pi_6 = y_c \rho^0 h^{-1} v_m^0$$

$$\pi_6 = \frac{y_c}{h} \quad [41]$$

Sétimo parámetro adimensional

$$\pi_7 = p \rho^a h^b v_m^c = [L][ML^{-3}]^a [L]^b [LT^{-1}]^c = M^a L^{1-3a+b+c} T^{-c}$$

$$a = 01 - 3a + b + c = 0 - c = 0$$

$$1 + b = 0$$

$$b = -1$$

$$\pi_7 = p \rho^0 h^{-1} v_m^0$$

$$\pi_7 = \frac{p}{h} \quad [42]$$

Octavo parámetro adimensional

$$\pi_8 = \varepsilon \rho^a h^b v_m^c = [L][ML^{-3}]^a [L]^b [LT^{-1}]^c = M^a L^{1-3a+b+c} T^{-c}$$

$$a = 01 - 3a + b + c = 0 - c = 0$$

$$1 + b = 0$$

$$b = -1$$

$$\pi_8 = \varepsilon \rho^0 h^{-1} v_m^0$$

$$\pi_8 = \frac{\varepsilon}{h} \quad [43]$$

Onceavo parámetro adimensional

$$\pi_{11} = g \rho^a h^b v_m^c = [LT^{-2}][ML^{-3}]^a [L]^b [LT^{-1}]^c = M^a L^{1-3a+b+c} T^{-2-c}$$

$$a = 0 \quad 1 - 3a + b + c = 0 \quad -2 - c = 0$$

$$1 + b - 2 = 0 \quad c = -2$$

$$b = 1$$

$$\pi_{11} = g \rho^0 h^1 v_m^{-2}$$

$$\pi_{11} = \frac{gh}{v_m^2} \quad [44]$$

Doceavo parámetro adimensional

$$\pi_{12} = P \rho^a h^b v_m^c = [ML^{-1}T^{-2}][ML^{-3}]^a [L]^b [LT^{-1}]^c = M^{1+a} L^{-1-3a+b+c} T^{-2-c}$$

$$1 + a = 0 \quad -1 - 3a + b + c = 0 \quad -2 - c = 0 \quad a = -1 \quad -1 - 3(-1) + b - 2 = 0 \quad c = -2$$

$$b = 0$$

$$\pi_{12} = P \rho^{-1} h^0 v_m^{-2}$$

$$\pi_{12} = \frac{P}{\rho v_m^2} \quad [45]$$

Treceavo parámetro adimensional

$$\pi_{13} = \mu \rho^a h^b v_m^c = [ML^{-1}T^{-1}][ML^{-3}]^a [L]^b [LT^{-1}]^c = M^a L^{1-3a+c} T^{-1-c}$$

$$1 + a = 0 \quad -1 - 3a + b + c = 0 \quad -1 - c = 0 \quad a = -1 \quad -1 - 3(-1) + b - 1 = 0 \quad c = -1$$

$$b = -1$$

$$\pi_{13} = \gamma \rho^{-1} h^{-1} v_m^{-1}$$

$$\pi_{13} = \frac{\mu}{\rho h v_m} \quad [46]$$

Catorceavo parámetro adimensional

$$\pi_{14} = \sigma \rho^a h^b v_m^c = [MT^{-2}][ML^{-3}]^a [L]^b [LT^{-1}]^c = M^a L^{1-3a+c} T^{-1-c}$$

$$1 + a = 0 - 3a + b + c = 0 - 2 - c = 0 \quad a = -1 - 3(-1) + b - 2 = 0 \quad c = -2$$

$$b = -1$$

$$\pi_{14} = \sigma \rho^{-1} h^{-1} v_m^{-2}$$

$$\pi_{14} = \frac{\sigma}{\rho h v_m^2} \quad [47]$$

Se expresa la relación adimensional que define el fenómeno estudiado, no se consideran la altura de escalón, la densidad del fluido ni la velocidad media, por ser los parámetros fundamentales del análisis.

$$E_r = f\left(\frac{b}{h}, \frac{H_{dam}}{h}, \frac{l}{h}, \frac{y_c}{h}, \frac{p}{h}, \frac{\varepsilon}{h}, \alpha, \frac{gh}{v_m^2}, \frac{P}{\rho v_m^2}, \frac{\gamma h}{\rho v_m^2}, \frac{\mu}{\rho h v_m}, \frac{\sigma}{\rho h v_m^2}\right) \quad [48]$$

Que se puede escribir como:

$$\frac{\Delta E}{E_o} = f\left(\frac{b}{h}, \frac{H_{dam}}{h}, \frac{l}{h}, \frac{y_c}{h}, \frac{p}{h}, \frac{\varepsilon}{h}, \alpha, Fr, Eu, Re, We\right) \quad [49]$$

$$\begin{array}{lll} \pi_1 = \frac{\Delta E}{E_o} & \pi_6 = \frac{y_c}{h} & \pi_{11} = \frac{g}{h v_m^2} \\ \pi_2 = \frac{b}{h} & \pi_7 = \frac{p}{h} & \pi_{12} = \frac{P}{\rho v_m^2} \\ \pi_3 = \frac{H_{dam}}{h} & \pi_8 = \frac{\varepsilon}{h} & \pi_{13} = \frac{\mu}{\rho h v_m} \\ \pi_5 = \frac{l}{h} & \pi_9 = \alpha & \pi_{14} = \frac{\sigma}{\rho h v_m^2} \end{array}$$

Donde:

- $\frac{b}{h}, \frac{H_{dam}}{h}, \frac{l}{h}, \alpha$, son las relaciones adimensionales entre variables geométricas.

- $\frac{y_c}{h}$, es la relación del tirante crítico con la altura de escalón
- $\frac{p}{h}$, es la relación entre la presión y la altura de escalón
- $\frac{\varepsilon}{h}$, es la relación entre la rugosidad relativa y la altura de escalón
- Fr , es el número de Froude que representa el cociente entre fuerzas de inercia y gravitatorias.
- Eu , es el número de Euler que proporciona una relación entre las fuerzas de presión aplicadas sobre el fluido y las fuerzas de inercia.
- Re , es el número de Reynolds que da la razón entre las fuerzas de inercia y las viscosas.
- We , es el número de Weber, que representa el cociente entre las fuerzas de inercia y la tensión superficial.

Para poder predecir el comportamiento de las estructuras a nivel de prototipo (*Estructura prototipo E_p*) en cuanto a sus características generales es necesario, recurrir a modelos experimentales en laboratorio (*Estructura modelo E_m*), que se pueden estudiar según criterios de semejanza:

- Semejanza de Froude

$$Fr_p = Fr_m$$

- Semejanza de Weber

$$We_p = We_m$$

- Semejanza de Reynolds

$$Re_p = Re_m$$

- Semejanza de Euler

$$Eu_p = Eu_m$$

- Semejanza geométrica

$$Geom_p = Geom_m$$

- Semejanza en los fluidos.

Se debe tener en cuenta que, tanto en el modelo como en el prototipo, se trabaja con agua y aire. Sin embargo, en la presente investigación no se tiene el instrumental necesario para medir la concentración de aire, por lo que no se considera en el análisis, asumiendo que su influencia no es significativa.

Como se ha mencionado antes, existe la imposibilidad de realizar un modelo que represente en simultáneo todas las semejanzas. Según la bibliografía de trabajos de investigación de aliviaderos escalonados, se ha trabajado a partir de la semejanza de Froude, con estructuras que mantienen la semejanza geométrica con el prototipo.

CAPÍTULO IV

4. DESCRIPCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA Y DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

4.1. Introducción

El trabajo se ha llevado a cabo en el laboratorio de Hidráulica y Mecánica de fluidos del Programa profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Católica Santa María y en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional San Agustín, con equipamiento perteneciente al grupo de investigación multidisciplinario “Ingeniería de Hidrosistemas”

Equipamiento propio del grupo de investigación multidisciplinario “Ingeniería de Hidrosistemas”:

- Canal Hidrodinámico.
- Tanque de almacenamiento.
- Sistema de suministro de agua del modelo.
- Estructura de soporte del modelo.

Equipamiento propio.

- Modelo de aliviadero escalonado
- Panel piezométrico.

4.2. Modelo Hidrodinámico

4.2.1. Canal hidrodinámico

El canal hidrodinámico consta de 8 secciones de canal armable, que en conjunto suman doce m. de longitud efectiva de canal.

4.2.2. Aliviadero Estricto

La forma de la coronación de aliviaderos que tienen un desempeño óptimo son aquellos que se adaptan a la lámina inferior de agua en caída libre que produce un vertedero de pared delgada.

Se ha tomado en consideración la metodología de la United State Bureau of Reclamation (USBR) para el diseño del perfil del aliviadero. Las curvas aguas arriba de la cresta obedecen a una curva circular compuesta. Aguas debajo de la cresta la curva está definida por la ecuación:

$$\frac{y}{H_o} = -K \left(\frac{x}{H_o} \right)^n \quad [50]$$

Donde:

H_o , es la altura total de la lámina vertiente sobre la coronación que incluye la velocidad de aproximación.

" x " y " y ", son los valores de las coordenadas del perfil del aliviadero, aguas debajo de la cresta.

" K " y " n ", son constantes cuyos valores dependen de la inclinación del paramento de aguas arriba y de la velocidad de aproximación del agua.

4.2.2.1. Caudal evacuado sobre un vertedero ajustado a la lámina vertiente

Según la USBR:

$$Q = CLH_e^{3/2} \quad [51]$$

Donde:

Q : Caudal

C : Coeficiente de descarga, función de variables como tirante de aproximación, relación entre la inclinación del paramento aguas arriba y tirante aguas abajo.

L : Longitud efectiva de coronación.

H_e : Altura de la lámina vertiente sobre la coronación, incluye la altura de la velocidad de aproximación (h_a).

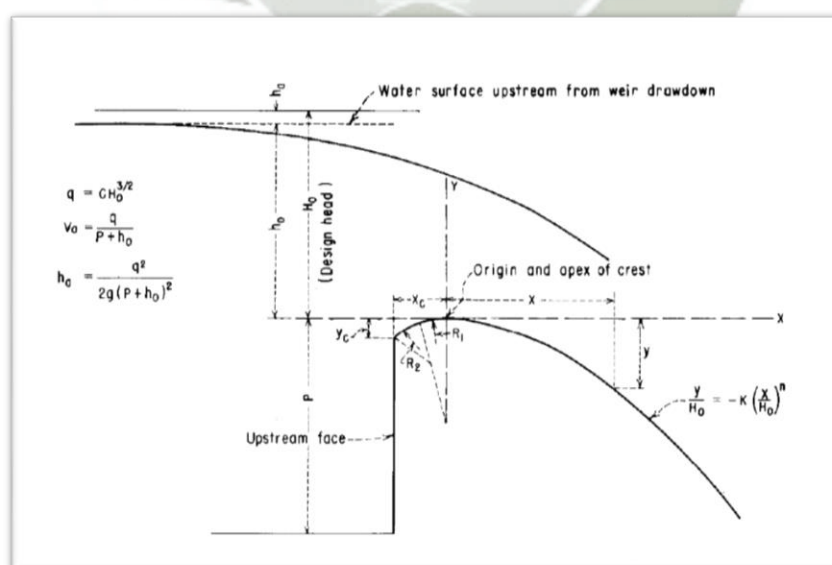


Figura. 23.-Elementos de perfil de un vertedero estricto
Fuente: SMALL DAMS USBR (pág. 366)

Los valores constantes de k y n se determinan a partir de la inclinación del paramento de arriba y de la velocidad de aproximación del agua (Figura N°24).

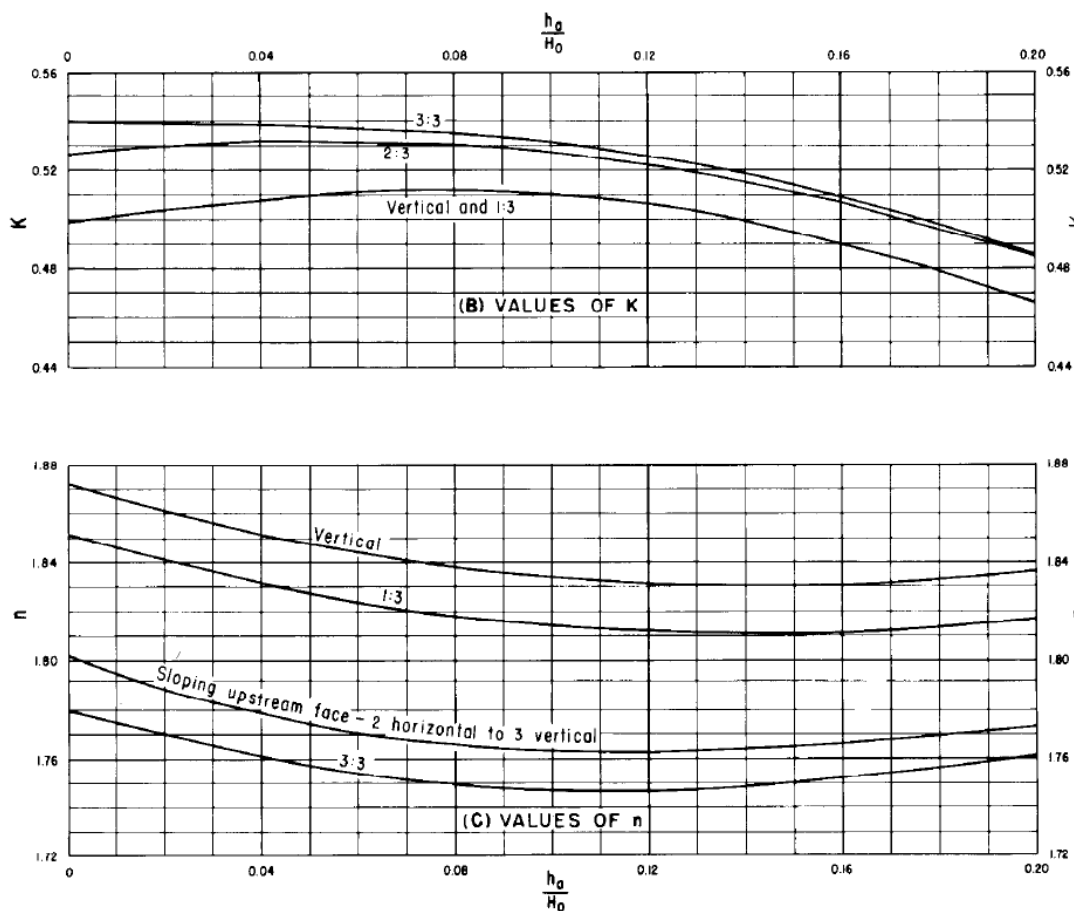


Figura. 24.-Coeficientes que definen el perfil del vertedero estricto
Fuente: Small Dams USBR (pág. 366)

Curva aguas arriba de la coronación

Aguas arriba de la cresta la el vertedero se compone de una curva compuesta, cuyos radios dependen de la lámina de agua encima de la coronación, (figura 25.)

4.2.2.2. Coeficiente de descarga de un aliviadero de perfil estricto.

Se toma como referencia un vertedero de pared delgada, donde a medida que el flujo se aproxima al vertedero con una velocidad pequeña, se da lugar la máxima contracción vertical de la lámina vertiente. En base a estos conceptos la USBR propone un gráfico (Figura N°26) que relaciona el coeficiente C_o con valores de P/H_0 , cabe resaltar que este ábaco es utilizable siempre que la coronación adopte la forma ideal de la lámina vertiente.

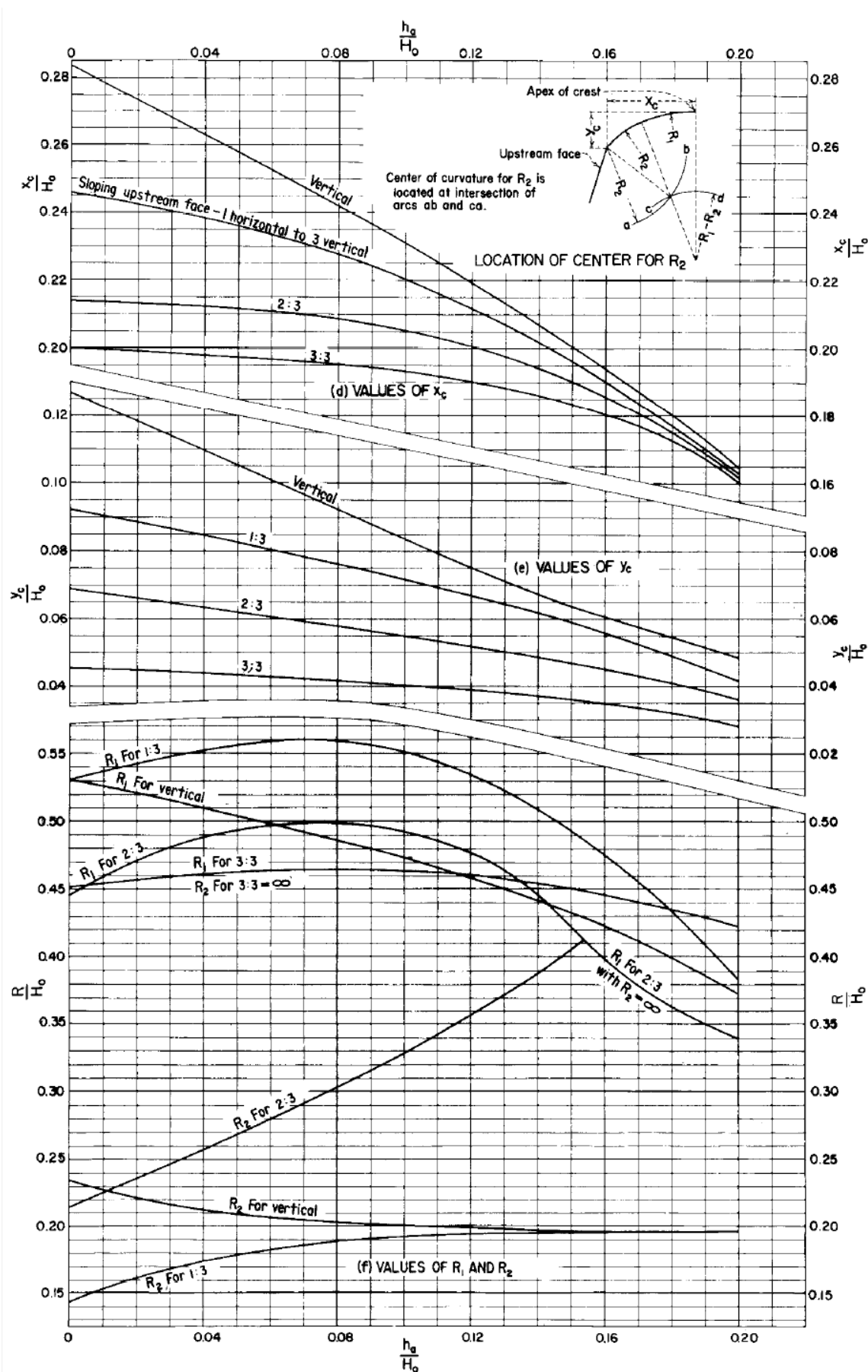


Figura. 25.-Coeficientes que definen el perfil del vertedero estricto

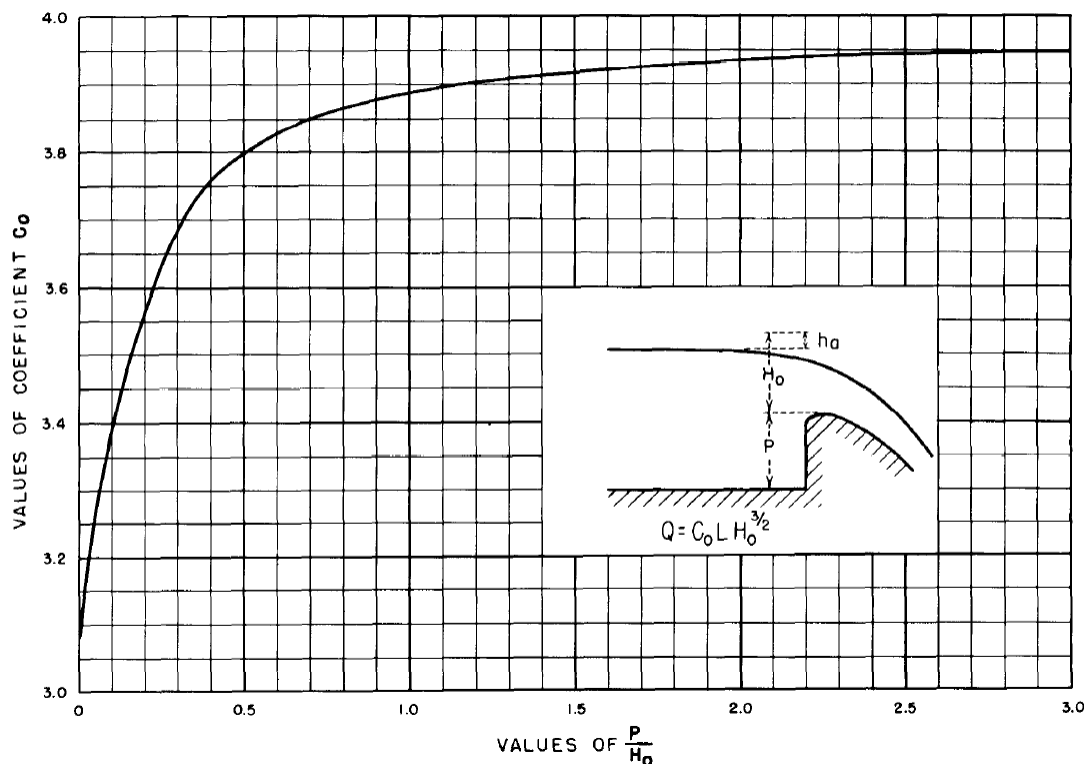


Figura. 26.-Coeficientes de descarga para vertederos estricto con pared vertical aguas arriba
Fuente: SMALL DAMS USBR(pág 370)

Gehy (1982) obtuvo las ecuaciones para el coeficiente de descarga C_o en función de la relación P/H_o , donde P es la altura del paramento de aguas arriba, y H_o la carga de diseño sobre el vertedero, siendo $H_o = H_e$. (Como se cita García).

$$\text{Si } 0 \leq \frac{P}{H_o} < 0.5 \text{ se tiene } C_o = -2.025 \left(\frac{P}{H_o}\right)^2 + 1.8 \left(\frac{P}{H_o}\right) + 1.704 \quad [52]$$

$$\text{Si } 0.6 \leq \frac{P}{H_o} < 2.5 \text{ se tiene } C_o = -0.034 \left(\frac{P}{H_o}\right)^2 + 1.45 \left(\frac{P}{H_o}\right) + 2.031 \quad [53]$$

$$\text{Si } \frac{P}{H_o} \geq 2.5 \text{ se tiene } C_o = 2.18 \quad [54]$$

Existe también un efecto producido cuando se trabajan cargas de agua diferentes a las de diseño, donde el valor del coeficiente obtenido de la figura ... no es válido. Si existe una carga mayor, se producen presiones positivas a lo largo de la coronación, reduciendo el caudal. Si la carga por el contrario es menor, habrá presiones negativas

en la superficie de contacto y aumenta el caudal desaguado. Para este caso la USBR propone un ábaco (Figura N° 27) para relacionar la altura de lámina de diseño con la presente encima de la coronación. El ábaco proporciona un factor de corrección para el coeficiente C_o en base a la relación de la altura de lámina de agua presente sobre la coronación.

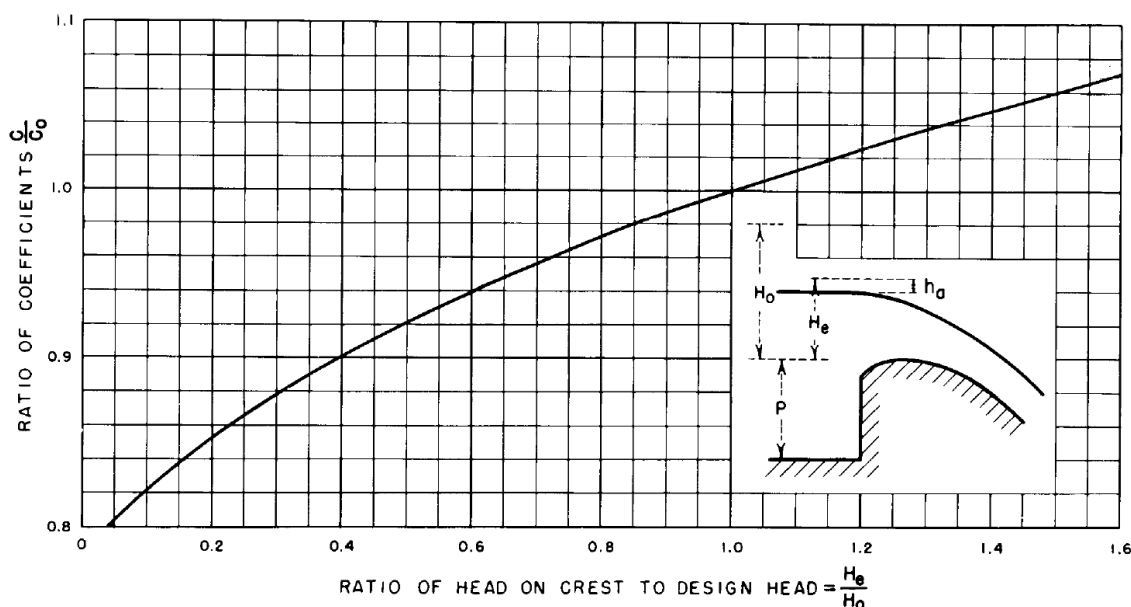


Figura. 27.-Coeficiente de descarga para alturas de lámina de agua sobre la coronación diferentes a las de diseño

Fuente: SMALL DAMS USBR(pág 371)

$$C_o' = 0.212 \left(\frac{H_e}{H_o} \right)^{2/3} + 0.788 \quad [55]$$

La inclinación del paramento, la interferencia aguas abajo del pie del vertedeto y la sumergencia aguas abajo también influyen en el caudal desaguado por el aliviadero, para lo cual la USBR también propone ábacos para corregir el coeficiente de descarga.

4.2.2.3. Diseño del perfil tipo Creager

Se parte con datos iniciales, caudal, ancho de la coronación (definido por la geometría del canal), altura de aliviadero (definido por la altura del canal, teniendo en cuenta la lámina de agua y el borde libre) y el coeficiente que se asume como uno para realizar una primera iteración:

$$Q = 0.06 \frac{m^3}{s}$$

$$L = 0.4575 \text{ m}$$

$$C = 1$$

$$P = 0.23$$

$P = \text{altura del canal} - \text{lámina de agua} - \text{borde libre}$

- Cálculo de la carga total sobre la cresta, incluye la carga de velocidad de aproximación.

$$H_o = \frac{Q}{(C * L)^{3/2}}$$

$$H_o = \frac{0.06}{(1 * 0.4575)^{3/2}}$$

$$H_o = 0.258 \text{ m}$$

- Determinación de la Carga de velocidad aproximada del flujo

$$h_a = \left(\frac{Q}{(P + H_o)L} \right)^2 (2g)^{-1}$$

$$h_a = \left(\frac{0.06}{(0.23 + 0.258)0.4575} \right)^2 (2 * 9.81)^{-1}$$

$$h_a = 3.679 \text{ E-3}$$

- Diferencia entre la carga de agua sobre la cresta y la carga de la velocidad aproximada del flujo.

$$H_e = H_o - h_a$$

$$H_e = 0.258 - 3.679 \text{ E-3}$$

$$H_e = 0.2545 \text{ m}$$

- Cálculo del coeficiente de gasto C_o .

$$P/H_o = 0.23/0.258$$

$$P/H_o = 0.891$$

Con

$$C_o = -0.034 \left(\frac{P}{H_o} \right)^2 + 1.45 \left(\frac{P}{H_o} \right)^2 + 2.031$$

$$C_o = 2.134$$

Corrección del factor C_o .

$$C_o' = 0.212 \left(\frac{H_e}{H_o} \right)^2 + 0.788$$

$$C_o' = 0.212 \left(\frac{0.255}{0.258} \right)^2 + 0.788$$

$$C_o' = 0.998$$

$$C_{o1} = (C_o')(C_o)$$

$$C_{o1} = (0.998)(2.134)$$

$$C_{o1} = 2.130$$

Valores corregidos de H_o , H_a y H_e con el valor de C_{o1}

$$H_o = \frac{0.06}{(2.130 * 0.4575)^{3/2}}$$

$$H_o = 0.156 \text{ m}$$

$$h_a = \left(\frac{0.06}{(0.23 + 0.156)0.4575} \right)^2 (2 * 9.81)^{-1}$$

$$h_a = 5.89 \text{ E-3 m}$$

$$H_e = 0.156 - 5.89 \text{ E-3}$$

$$H_e = 0.150 \text{ m}$$

Cálculo de valor de "k".

$$h_a/H_o = 5.89 \text{ E-3} / 0.156$$

$$h_a/H_o = 3.775 \text{ E-2}$$

Con el valor h_a/H_o recurrimos a la figura 24 (Coeficientes que definen el perfil del vertedero estricto.)

Obtenemos un valor de k

$$k = 0.507$$

De forma similar obtenemos el valor de n en el mismo ábaco

$$n = 1.854$$

A partir de estos valores se define la ecuación que gobierna el perfil estricto aguas abajo la cresta.

$$\frac{y_o}{0.156} = -0.507 \left(\frac{x}{0.156} \right)^{1.854}$$

Con esta ecuación se definen las alturas de los primeros escalones, con lo cual se definirá la altura “P” del paramento. El valor obtenido para el paramento se reemplaza en los datos iniciales para comenzar un nuevo cálculo y ajustar los coeficientes.

El procedimiento se repite las veces necesarias hasta eliminar errores en la altura del paramento y coeficientes. Finalmente se obtienen:

$$P = 0.226 \text{ m}$$

$$H_o = 0.156 \text{ m}$$

$$h_a = 6.021 \text{ E-3 m}$$

$$H_e = 0.150 \text{ m}$$

$$k = 0.508$$

$$n = 1.853$$

$$\frac{y_o}{0.156} = -0.508 \left(\frac{x}{0.156} \right)^{1.853} \quad [56]$$

Con esta ecuación, se definen las alturas de los cinco primeros escalones:

Nº Escalón	Altura (mm)
1	6.364
2	16.626
3	25.745
4	34.318
5	42.530
Total	125.583

Tabla. 4.- Altura de los escalones de transición

Se define que en la parte superior del canal (canal de aproximación) se colocarán siete escalones que definen la altura “P” del paramento.

Se determinan los valores para la curva compuesta aguas arriba de la cresta:

Cálculo de las coordenadas del principio de la curva

$$h_a/H_o = 6.021 \text{ E-3}/0.156$$

$$h_a/H_o = 3.86 E-2$$

$$X_c/H_o = 0.264$$

$$X_c = 4.118 E-2 m$$

$$Y_c/H_o = 0.11$$

$$Y_c = 1.716 E-2 m$$

Cálculo de los radios de la curva compuesta:

$$R_1/H_o = 0.51$$

$$R_1 = 7.956 E-2 m$$

$$R_2/H_o = 0.213$$

$$R_2 = 3.323 E-2 m$$

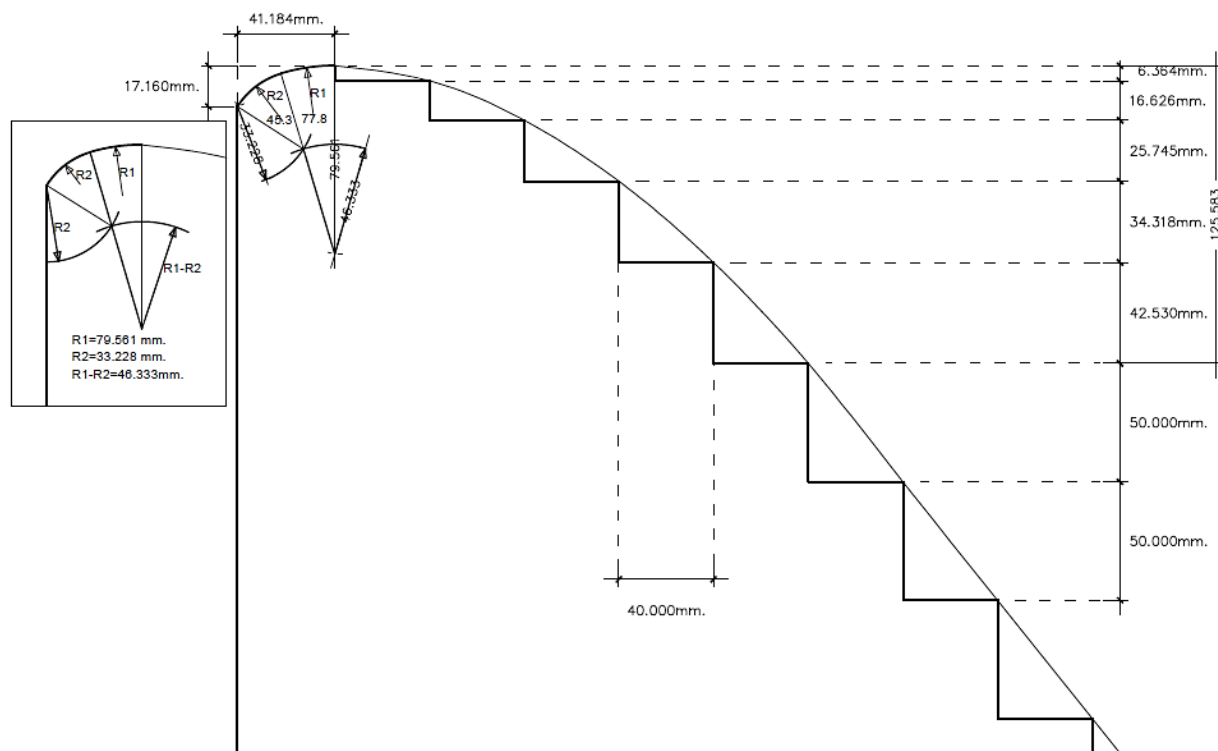


Figura. 28.-Detalle de escalones de transición (altura de contrahuella variable) ^{PA}

4.2.3. Modelo del sistema hidrodinámico

El canal hidrodinámico perteneciente al grupo de investigación “Ingeniería de Hidrosistemas” se diseñó con la idea que sea transportable, para este fin, se realizaron módulos de canal, lo suficientemente grandes para realizar los ensayos y

lo suficientemente pequeños para su transporte. Gracias a la su versatilidad es posible movilizar el canal de un punto a otro en unos días.

El perfil del aliviadero escalonado asemeja la coronación a un perfil estricto tipo CREAGER, se escogió este tipo de perfil debido a, la bibliografía con la que se cuenta y a su vez es el escogido para investigaciones en la mayor parte de bibliografía consultada.

Partiendo de la bibliografía sobre modelamiento de aliviaderos escalonados, se planteó la necesidad de construir un modelo hidráulico con las dimensiones necesarias para reproducir los fenómenos que se presentan en la naturaleza.

4.2.3.1. Sistema de suministro de agua

El sistema de suministro de agua, compuesto por el canal hidrodinámico y el sistema de impulsión de agua, consta de las siguientes partes:

- Depósito acumulador: Ubicado aguas abajo del canal hidrodinámico. Depósito principal del sistema hidrodinámico, alberga la mayor parte del agua necesaria para el funcionamiento del canal.

Piscina armable “Best Way”

- ✓ Capacidad: 2.60 m³
 - ✓ Largo: 2.59 m
 - ✓ Ancho: 1.70 m
 - ✓ Alto: 0.61 m
- Tubería de succión: Para succionar agua del depósito acumulador, van directamente de la piscina a las bombas. Compuestas de plástico reforzado con hélice de acero.
- Bombas de impulsión: Encargadas de recircular el agua en el modelo hidrodinámico.
- Dos bombas de marca “Humbolt GP-100” y “Meba” de 9 hp y 13hp respectivamente, con capacidades de bombeo máximo de 1600 L/min y 2200 L/min respectivamente (figura 29)
- Tubería de impulsión: Manguera plana flexible conectada a las bombas, que van directamente al depósito regulador.
Fabricada en PVC plastificada, reforzada interiormente con fibra poliéster, de 3 pulg. y 4 pulg.



Figura. 29.-Bomba de impulsión. Meba 13HP^{PA}

- Depósito Regulador: Parte inicial del canal hidrodinámico, ubicado en la parte posterior de la estructura, encargada de disipar la fuerza del agua que viene de las tuberías de impulsión. Constituida de paredes de metal combinado con metacrilato, unida con soldadura, ensamblada con pernos de $\frac{1}{4}$ de pulgada y reforzada con silicona fría.
 - ✓ Capacidad 2.60 m³
 - ✓ Largo: 0.90 m
 - ✓ Ancho: 0.60 m
 - ✓ Alto: 0.80 m
- Disipador de energía: Estructura de forma aplanada encargada de disipar el oleaje producido por la fuerza de llegada de agua de las tuberías de impulsión hacia el depósito regulador.
- Canal hidrodinámico: Ubicado junto al depósito regulador, constituida de base de metal con paredes de metacrilato, dividida en dos partes, cada una de 6 m. de largo, a fin de generar el desnivel suficiente para la colocación del aliviadero escalonado. El desnivel fijado entre las dos secciones de canal es de 50 cm. Fabricada por módulos, la base y los soportes con láminas y ángulos de acero y las paredes con metacrilato. Las láminas se unieron con soldadura y el metacrilato con silicona fría, adicionalmente se colocaron pernos para inmovilizar cada módulo.
 - ✓ Capacidad 100 l/s
 - ✓ Largo: 1.50 m.
 - ✓ Ancho: 0.46 m.
 - ✓ Alto: 0.50 m.

Proceso constructivo Aliviadero escalonado

Se partió de la premisa de construir un modelo de aliviadero que permita visualizar el flujo y sus características principales, para ello se siguieron la teoría de perfiles estrictos, tipo creager específicamente, el diseño se detalló en el acápite 3.2.2.3

El aliviadero escalonado se sitúa en medio del canal hidrodinámico, donde se generó un desnivel de 50 cm. de alto, el aliviadero se eleva por encima del canal 22.5 cm. que sumado al desnivel le da una altura total de 72.5 cm de alto.

El aliviadero consta de 17 escalones en total, 12 de ellos son de dimensiones idénticas de 50 mm de alto y 40 mm de huella. Cuenta con 5 escalones de transición de altura variable que adaptan sus alturas a un perfil tipo Creager. El diseño de la transición se visualiza en la figura.

- Aliviadero escalonado: Fabricado con láminas de acero y metacrilato, se realizaron los siguientes pasos para su construcción
 - Se realizó el diseño del perfil tipo Creager, para ajustar los primeros escalones a la curva del aliviadero,
 - Se realizaron diseños para la estructura de soporte del aliviadero.
 - Se construyeron moldes de cartón de la estructura de soporte del aliviadero, a fin de verificar la geometría de la estructura.
 - Se cortaron planchas de acero para los soportes del aliviadero escalonado, este procedimiento fue realizado mediante un proceso denominado “corte por plasma” en un centro mecanizado, este tipo de corte funciona mediante un software que reconoce la geometría proporcionada (formato .dwg) a fin de reducir al máximo los errores que se presentan realizando el corte manual.

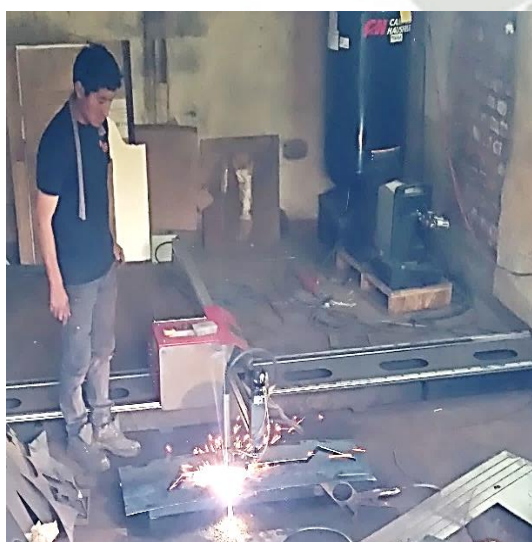


Figura. 30.-Corte de la plancha de acero para la estructura de soporte del aliviadero escalonado y vista de la estructura base ^{PA}

- Se pulió y limpió la estructura de soporte del aliviadero, se verificaron las medidas.



Figura. 31.-Detalle de los escalones de transición y Vista frontal de la estructura de soporte ^{PA}

- Se procedió con el ensamblaje de la estructura de soporte del aliviadero, se unieron las piezas con soldadura.
- Se pintó la estructura de soporte del aliviadero.

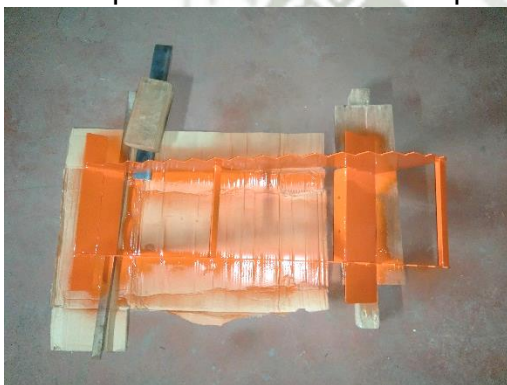


Figura. 32.-Proceso de pintado estructura de soporte ^{PA}

- Se cortó el metacrilato para los escalones.

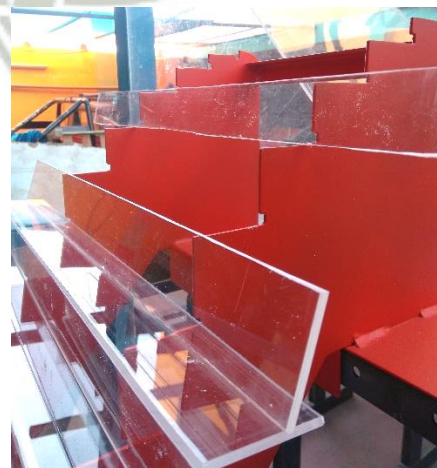


Figura. 33Trazo para corte del metacrilato (a utilizar para los escalones) ^{PA}

- Para realizar la curva característica del perfil tipo Creager con metacrilato, se utilizó un molde de madera, previamente cortado y pulido. El metacrilato se calentó con una pistola de aire hasta conseguir que fuera lo suficientemente maleable para darle el acabado de la curva característica



Figura. 34.-Curva del aliviadero, moldeado con pistola de aire caliente (sobre molde de madera) ^{PA}

- Se utilizó metacrilato líquido para unir las piezas del aliviadero escalonado previamente colocado sobre su estructura de soporte.



Figura. 35.-Sellado del metacrilato mediante soldadura con metacrilato líquido ^{PA}

- Se reforzaron las juntas de metacrilato para evitar fugas de agua.
- Se realizó el corte del panel de medidas piezométricas en melamina.
- Se colocaron las tuberías de PVC transparente en los escalones a fin de describir el comportamiento de la presión a lo largo de los escalones del aliviadero.



Figura. 36.-Abertura de agujeros para colocación de piezómetros ^{PA}

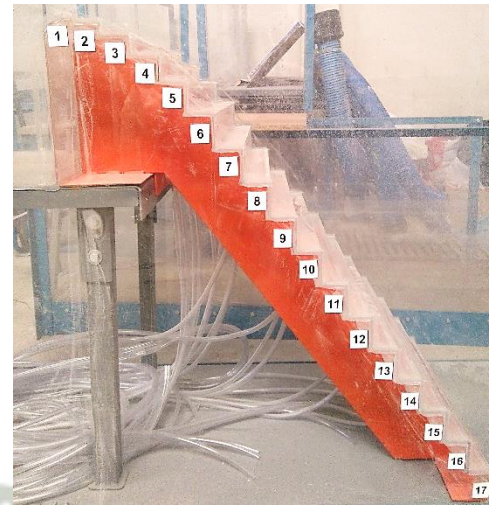


Figura. 37 Colocación de piezómetros en aliviadero escalonado ^{PA}

4.2.3.1.1. Materiales

Como ya se ha mencionado tanto el canal como el aliviadero están contruidos con planchas de acero y metacrilato, adicionalmente se necesitaron algunos otros materiales:

- Planchas de acero de 3 mm de espesor.
- Planchas de metacrilato de 4 mm de espesor.
- Ángulos de acero.
- Pernos ¼ de pulgada.
- Tubo de acero de 5 cm x 8 cm x 3 mm
- Tubo de PVC de 6 mm, de diámetro.
- Planchas de cartón prensado.
- Pintura (diferentes colores).
- Mangueras de PVC 3 y 4 plg. de diámetro.
- Silicona fría Sika 620.
- Lija para metal G50.
- Bloque de madera cedro 50 x 25 x 10 cm
- Disco de corte Norton BDA 08.
- Disco para pulir Norton.

4.2.3.1.2. Equipo de mano

- Flexómetro.
- Nivel de mano.
- Martillo.

- Serrucho
- Escuadra.
- Pistola de silicona fría.
- Llaves de ajuste
- Llave inglesa.
- Prensas metálicas.

4.2.3.1.3. Maquinaria

- Amoladora “Bosch” modelo GWS 24 230 JBX.
- Máquina de soldar genérica.
- Pistola de aire caliente “Bosch” GHG 630.
- Taladro “De Walt” 3/8 12v.
- Compresora.

4.3. Trabajo de Laboratorio – Metodología experimental

4.3.1. Nivelación de la estructura

Se realiza la nivelación de la estructura a fin de asegurar que la pendiente del canal es la deseada. Se trabaja con un nivel de ingeniero, durante el armado de todas las piezas del modelo hidráulico

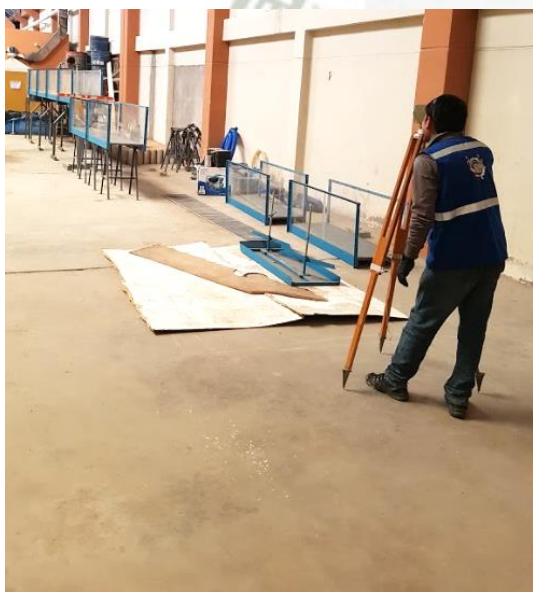


Figura. 38.- Nivelación del canal con nivel de ingeniero ^{PA}



Figura. 39.- Nivel de Ingeniero (Kern) ^{PA}

4.3.2. Plan de pruebas para el modelo de aliviadero escalonado

En el diseño se ha planteado el caudal máximo a ensayarse en el modelo hidrodinámico, dejando un borde libre lo suficientemente alto para evitar desbordamiento, este es el factor limitante no solo para el caudal, sino para la altura del aliviadero en lo que respecta al número de escalones.

4.3.3.Caudales a ser ensayados

Se ensayan caudales en modelo, que varían desde los 12.17 l/s a 47.24 l/s, y que en prototipo se muestran en la tabla N° 5, se trabajaron con 56 caudales, en la tabla se muestran algunos de ellos, en el anexo 1, se muestra la totalidad de caudales ensayados en la experimentación.

CAUDAL			
Escala	12	18	24
MODELO [l/s]	PROTOTIPO [m ³ /s]		
10.66	5.32	14.65	30.07
19.43	9.69	26.71	54.82
29.66	14.80	40.77	83.70
38.28	19.09	52.61	108.01
46.93	23.41	64.51	132.43
54.26	27.07	74.59	153.12

Tabla. 5.-Rango de caudales de laboratorio y extrapolación a prototipo (escalas 1/12, 1/18 y 1/24)^{PA}

Dada la geometría del aliviadero, se establecen las escalas de prototipo correspondientes. Se muestra el procedimiento para uno de los caudales de la tabla nro. 5

$$L = \frac{h_{\text{prototipo}}}{h_{\text{modelo}}} \quad [57]$$

Donde:

L: Factor de escala: 12, 18 y 24.

Valores con los que determinamos los caudales de prototipo, a partir de la fórmula:

$$L^{2.5} = \frac{Q_{\text{prototipo}}}{Q_{\text{modelo}}} \quad [58]$$

Para: Escala de prototipo 1:12

$$L = 12 \wedge Q_{\text{modelo}} = 54.82 \text{ l/s}$$

$$12^{2.5} = \frac{Q_{\text{prototipo}}}{54.82 \text{ l/s} * \frac{1 \text{ m}^3/\text{s}}{1000 \text{ l/s}}}$$

$$Q_{\text{prototipo}} = 27.35 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para: Escala de prototipo 1:18

$$L = 18 \wedge Q_{\text{modelo}} = 54.82 \text{ l/s}$$

$$18^{2.5} = \frac{Q_{\text{prototipo}}}{54.82 \text{ l/s} * \frac{1 \text{ m}^3/\text{s}}{1000 \text{ l/s}}}$$

$$Q_{\text{prototipo}} = 75.35 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para: Escala de prototipo 1:24

$$L = 24 \wedge Q_{\text{modelo}} = 54.82 \text{ l/s}$$

$$18^{2.5} = \frac{Q_{\text{prototipo}}}{54.82 \text{ l/s} * \frac{1 \text{ m}^3/\text{s}}{1000 \text{ l/s}}}$$

$$Q_{\text{prototipo}} = 154.69 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.3.4.Determinación de tirantes y perfiles de flujo.

A partir de la medición de los tirantes en las distintas secciones, se toma como referencia el eje longitudinal del modelo, el eje de coordenadas está ubicado al inicio del depósito de regulador, con estos parámetros se elaboran los perfiles de flujo que se presenta a lo largo del modelo hidrodinámico con los diferentes caudales trabajados en las campañas experimentales, las mediciones para los tirantes del se toman con reglas pegadas a las paredes de metacrilato y los tirantes a lo largo del aliviadero se toman directamente con una regla metálica.

Los tirantes en el canal se toman perpendiculares a la dirección de la corriente del flujo, esto mismo ocurre en el aliviadero escalonado, donde se toman las medidas inclinadas o haciendo un ángulo de 90° con respecto a la línea imaginaria formado por las aristas de los escalones, teniendo en cuenta que el tipo de flujo que se presenta en los ensayos es el flujo rasante.

4.3.5.Determinación del caudal

El caudal se calcula en base a los tirantes medidos aguas arriba del aliviadero, específicamente se trabaja con el promedio de tirantes medidos en la coordenada $x = -0.677$.

De acuerdo con la ecuación $Q = CLH^{2/3}$, el caudal resultante está en función del coeficiente de descarga, el ancho de la coronación y la altura de la lámina de agua, cuyo valor es el de la coordenada mencionada en el párrafo anterior. El coeficiente de descarga debe ajustarse de acuerdo a factores como la relación de la altura de paramento y la lámina de agua, inclinación del paramento y si existen cargas de agua distintas a las de diseño.

4.3.6.Determinación de Velocidades

Las velocidades se calculan a partir de los tirantes medidos, para cada uno de los puntos de medición de tirantes, adicionalmente se calcula la velocidad de superficie mediante el método del flotador, a fin de comparar a las velocidades obtenidas con las velocidades calculadas.

4.3.7.Determinación de Presiones

La carga de presión a lo largo del aliviadero se hace con el fin de observar el comportamiento de la presión en los escalones, se obtienen a partir de los tubos de PVC transparentes (piezómetros), previamente encebados (llenados de agua hasta alcanzar la altura de escalón) colocados a lo largo del aliviadero. Se colocaron tres tubos en determinados escalones, la principal restricción es el espacio reducido que se tiene en los pasos, por lo que se colocaron las tuberías separadas del eje longitudinal.

Como se explica en la sección 4.9.4, la distribución de los tubos de PVC se realiza en base a la bidimensionalidad del flujo, gracias a este comportamiento se dispone de la mayor cantidad de piezómetros posible para el modelo.

Se realizaron pruebas para verificar el comportamiento bidimensional en el modelo de aliviadero escalonado, se colocaron seis tubos de PVC transparente para medir la presión a lo largo de dos escalones, los tubos fueron colocados en la misma coordenada longitudinal del aliviadero, a fin de hacer las comparaciones de las lecturas de presión.

En total se tienen quince piezómetros colocados en grupos de tres a lo largo de los escalones, específicamente colocados en los pasos: Primero, tercero, sexto noveno, doceavo y quinceavo.



Figura. 40.-Panel piezométrico en funcionamiento ^{PA}

CAPÍTULO V

5. CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA

Se presenta la aplicación del marco teórico, se dan a conocer las características de del flujo presentado en el modelo

Seguidamente se presentan los datos obtenidos de la experimentación.

El tipo de flujo que se presenta en el modelo hidrodinámico es el flujo en transición y flujo rasante, sin embargo, se determina los límites para todos los tipos flujo presentes en el modelo.

5.1. Determinación de límites para los tipos de flujo

5.1.1. Límite inferior de la altura para la formación del flujo escalón a escalón

Se aplica la ecuación presentada en el apartado 2.2.1.2

Considerando la geometría del modelo, se tiene:

Escala	Altura escalón	Caudal	LÍMITE INFERIOR FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN			
E	h	Q	h/Y_c	h mínima	Y_c Límite	Q
-	(m)	(m ³ /s)	-	(m)	(m)	(m ³ /s)
1	0.05	0.012	2.413	0.099	0.021	0.004
12	0.60	5.969	2.413	1.192	0.249	2.132
18	0.90	16.449	2.413	1.788	0.373	5.874
24	1.20	33.767	2.413	2.384	0.497	12.059

Tabla. 6.-Límite inferior para el flujo escalón a escalón ^{PA}

Para el prototipo 1:12, se muestra el procedimiento del cálculo de los límites para la ocurrencia de los distintos tipos de flujo. Con la fórmula N°2 de la sección 2.2.1.2

$$\frac{h}{y_c} = 0.57 \frac{h^3}{l^3} + 1.3$$

$$\frac{h}{y_c} = 0.57 \frac{0.05^3}{0.04^3} + 1.3 = 2.413$$

Con la fórmula para calcular el tirante crítico, utilizando un caudal de 5.969 m³/s, que viene a ser el caudal mínimo para el diseño del prototipo 1:12.

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{\left(\frac{5.969}{0.475 * 12}\right)^2}{9.81}} = 0.494$$

Se tiene:

$$\frac{h}{y_c} = 2.413$$

$$\frac{h_{\min}}{0.494} = 2.413$$

$$h_{\min} = 1.192 \text{ m.}$$

Para un caudal mínimo de 5.969 m³/s, para la formación del flujo escalón a escalón la altura del escalón debe ser mayor a 1.21 m. Dado que la altura de escalón para el prototipo es 0.60 m, este tipo de flujo se presenta para caudales menores:

Ahora, se podría calcular el caudal teórico para el cual se presenta el límite inferior del flujo escalón a escalón, sin embargo, se debe tener en cuenta que la fórmula está planteada para calcular la altura de escalón. Por lo que el siguiente cálculo se hace para comparar con el límite superior del flujo.

Con la altura de grada del prototipo h=0.60 m

$$\frac{h}{y_c} = 2.413$$

$$y_c \text{ límite} = 0.249 \text{ m}$$

Valor con el cual se calcula el caudal:

$$Q = q * b$$

$$Q = \sqrt{y_c^3 * g * b}$$

$$Q = \sqrt{0.249^3 * 9.81 * 0.4575 * 12}$$

$$Q = 2.132 \text{ m}^3/\text{s}$$

El caudal calculado (Q=2.132 m³/s) viene a ser el límite superior del flujo escalón a escalón, se ha calculado a fin de compararlo con la fórmula específica de este límite de flujo

5.1.2. Límite superior para la formación del flujo escalón a escalón

Escala	Altura escalón	Caudal	Caudal Específico	Tirante crítico	LÍMITE SUPERIOR FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN		
					h/Y_c	Y_c Límite	Q
-	(m)	(m ³ /s)	(m ² /s)	(m)	-	(m)	(m ³ /s)
1	0.05	0.012	0.026	0.041	2.293	0.022	0.005
12	0.60	5.969	1.087	0.494	2.293	0.262	2.302
18	0.90	16.449	1.997	0.741	2.293	0.393	6.344
24	1.20	33.767	3.075	0.988	2.293	0.523	13.022

Tabla. 7.-Límite superior para el flujo escalón a escalón^{PA}

Basados en la fórmula de Ohtsu Yasuda (1999), para determinar el límite superior del flujo escalón a escalón, se tiene:

Para el prototipo 1:12

$$\frac{y_c}{h} = \frac{\left(1.4 - \frac{h}{l}\right)^{0.26}}{1.4}$$

$$\frac{y_c}{h} = \frac{\left(1.4 - \frac{0.05}{0.04}\right)^{0.26}}{1.4}$$

$$\frac{h}{y_c} = 2.993$$

Con la altura de escalón igual a 0.60 m, se tiene:

$$y_c = 0.262 \text{ m}$$

Valor con el cual se calcula el caudal:

$$Q = q * b$$

$$Q = \sqrt{y_c^3 * g * b}$$

$$Q = \sqrt{0.262^3 * 9.81 * 0.4575 * 12}$$

$$Q = 2.302 \text{ m}^3/\text{s}$$

El caudal calculado ($Q=2.302 \text{ m}^3/\text{s}$) viene a ser el límite superior del flujo escalón a escalón, propuesto por Ohtsu Yasuda (1999), comparando con el resultado brindado por la fórmula de H. Chanson (1994) en el apartado 4.5.1.1 varía menos de $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.1.3. Límite inferior flujo transición

Escala	Altura escalón	Caudal	Caudal Específico	LÍMITE INFERIOR FLUJO TRANSICIÓN		
				Y_c/h	Y_c Límite	Q
-	(m)	(m ³ /s)	(m ² /s)	-	(m)	(m ³ /s)
1	0.05	0.012	0.026	0.441	0.022	0.005
12	0.60	5.969	1.087	0.441	0.265	2.342
18	0.90	16.449	1.997	0.441	0.397	6.453
24	1.20	33.767	3.075	0.441	0.529	13.246

Tabla. 8.-Límite inferior para el flujo en transición^{PA}

Se considera la fórmula para el flujo en transición que se presenta en la sección 2.2.1.3

$$\frac{Y_c}{h} > 0.9174 - 0.381 \frac{h}{l}$$

Como en las secciones precedentes se realiza el procesamiento de cálculo para el modelo 1:12

$$\frac{Y_c}{h} > 0.9174 - 0.381 \frac{0.05}{0.04}$$

$$\frac{Y_c}{h} > 0.441$$

Con la altura de escalón del prototipo igual a 0.60 m, se tiene:

$$Y_c > 0.265$$

Valor con el cual se calcula el caudal:

$$Q = q * b$$

$$Q = \sqrt{y_c^3 * g * b}$$

$$Q = \sqrt{0.265^3 * 9.81 * 0.4575 * 12}$$

$$Q > 2.342 \text{ m}^3/\text{s}$$

Lo cual varía con respecto al límite superior del flujo escalón a escalón propuesto por Ohtsu Yasuda en 0.04 m³/s.

5.1.4. Límite superior flujo transición

Se presenta el cálculo para determinar el límite superior para el flujo en transición.

Escala	Altura escalón	Caudal	Caudal Específico	LÍMITE SUPERIOR FLUJO TRANSICIÓN		
E	h	Q	q	Y_c/h	Y_c Límite	Q
-	(m)	(m ³ /s)	(m ² /s)	-	(m)	(m ³ /s)
1	0.05	0.012	0.026	0.813	0.041	0.012
12	0.60	5.969	1.087	0.813	0.488	5.854
18	0.90	16.449	1.997	0.813	0.731	16.131
24	1.20	33.767	3.075	0.813	0.975	33.113

Tabla. 9.-Límite superior para el flujo en transición^{PA}

Se considera la fórmula para flujo en transición que se presenta en la sección 2.2.1.3

$$\frac{y_c}{h} < \frac{0.9821}{\left(\frac{h}{l} + 0.388\right)^{0.384}}$$

$$\frac{y_c}{h} < \frac{0.9821}{\left(\frac{0.05}{0.04} + 0.388\right)^{0.384}}$$

$$\frac{Y_c}{h} < 0.813$$

Con la altura de escalón del prototipo igual a 0.60 m, se tiene:

$$y_c < 0.488$$

Valor con el cual se calcula el caudal:

$$Q = q * b$$

$$Q = \sqrt{y_c^3 * g * b}$$

$$Q = \sqrt{0.488^3 * 9.81 * 0.4575 * 12}$$

$$Q < 5.854 \text{ m}^3/\text{s}$$

5.1.5. Límite inferior flujo rasante

Se presenta el cálculo para determinar el límite inferior para el flujo rasante.

Según Chanson (1994)

Escala	Altura escalón	Caudal	Caudal Específico	LÍMITE INFERIOR FLUJO RASANTE		
				Y_c/h	y_c Límite	Q
-	(m)	(m ³ /s)	(m ² /s)	-	(m)	(m ³ /s)
1	0.05	0.012	0.026	0.476	0.024	0.005
12	0.60	5.969	1.087	0.476	0.285	2.622
18	0.90	16.449	1.997	0.476	0.428	7.227
24	1.20	33.767	3.075	0.476	0.571	14.835

Tabla. 10.-Límite inferior para el flujo rasante. Según Chanson (1994) ^{PA}

Según Ohtsu Yasuda (1999)

Escala	Altura escalón	Caudal	Caudal Específico	LÍMITE INFERIOR FLUJO RASANTE		
				Y_c/h	y_c Límite	Q
-	(m)	(m ³ /s)	(m ² /s)	-	(m)	(m ³ /s)
1	0.05	0.012	0.026	0.831	0.042	0.012
12	0.60	5.969	1.087	0.831	0.499	6.052
18	0.90	16.449	1.997	0.831	0.748	16.678
24	1.20	33.767	3.075	0.831	0.997	34.236

Tabla. 11.-Límite inferior para el flujo rasante. Según Ohtsu Yasuda (1994) ^{PA}

Amador Sanchez Dolz (2005):

Escala	Altura escalón	Caudal	Caudal Específico	LÍMITE INFERIOR FLUJO RASANTE		
				Y_c/h	y_c Límite	Q
-	(m)	(m ³ /s)	(m ² /s)	-	(m)	(m ³ /s)
1	0.05	0.011	0.024	0.822	0.041	0.012
12	0.60	5.531	1.007	0.822	0.493	5.960
18	0.90	15.241	1.851	0.822	0.740	16.424
24	1.20	31.287	2.849	0.822	0.987	33.715

Tabla. 12.-Límite inferior para el flujo rasante. Según Amador Sanchez Dolz (2005) ^{PA}

Según Chanson (1994):

Se considera la fórmula para flujo rasante [12] que se presenta en la sección 2.2.1.4

$$\frac{y_c}{h} > 1.057 - 0.465 \frac{h}{l}$$

$$\frac{y_c}{h} > 1.057 - 0.465 \frac{0.05}{0.04}$$

$$\frac{Y_c}{h} > 0.476$$

Con la altura de escalón del prototipo igual a 0.60 m, se tiene:

$$Y_c > 0.285$$

Valor con el cual se calcula el caudal:

$$Q = q * b$$

$$Q = \sqrt{y_c^3 * g * b}$$

$$Q = \sqrt{0.285^3 * 9.81 * 0.4575 * 12}$$

$$Q = 2.622 \text{ m}^3/\text{s}$$

Según Ohtsu Yasuda (1999):

Se considera la fórmula [13] que se presenta en la sección 2.2.1.4

$$\frac{Y_c}{h} > 0.862 \left(\frac{h}{l} \right)^{-1.65}$$

$$\frac{Y_c}{h} > 0.862 \left(\frac{0.05}{0.04} \right)^{-1.65}$$

$$\frac{Y_c}{h} > 0.831$$

Con la altura de escalón del prototipo igual a 0.60 m, se tiene:

$$Y_c > 0.499$$

Valor con el cual se calcula el caudal:

$$Q = q * b$$

$$Q = \sqrt{y_c^3 * g * b}$$

$$Q = \sqrt{0.831^3 * 9.81 * 0.4575 * 12}$$

$$Q > 6.052 \text{ m}^3/\text{s}$$

Según Amador Sánchez Dolz (2005):

Se considera la fórmula [14] que se presenta en la sección 2.2.1.4

$$\frac{Y_c}{h} = 0.854 \left(\frac{h}{l} \right)^{-0.169}$$

$$Q > 5.960 \text{ m}^3/\text{s}$$

Se observa que existe una brecha bastante marcada en los resultados brindados por las fórmulas, cabe resaltar que, según diversos autores es difícil caracterizar el flujo en transición, razón por la cual existe este tipo de variación en las fórmulas experimentales propuestas para el límite inferior del flujo rasante. Sin embargo, las fórmulas presentadas por Ohtsu Yasuda y Amador Sánchez Dolz concuerdan, por lo tanto:

FLUJO	CAUDAL (l/s)
Escalón a Escalón	$Q < 4.6$
Transición	$4.7 < Q < 11.7$
Rasante	$Q > 11.95$

Tabla. 13.-Resumen de los tipos de flujo que se presentan en el modelo según diversos autores .^{PA}

Dado que se dispone de caudal a partir de 10.66 l/s hasta 54.26 l/s estamos frente a dos tipos de flujo, en las cercanías del umbral de cambio del flujo en transición a rasante y el flujo rasante propiamente dicho.

5.2.Caracterización hidráulica del flujo en aliviaderos escalonados

Teniendo en cuenta los caudales trabajados en las campañas experimentales, para las características del aliviadero se presenta en transición y flujo rasante.

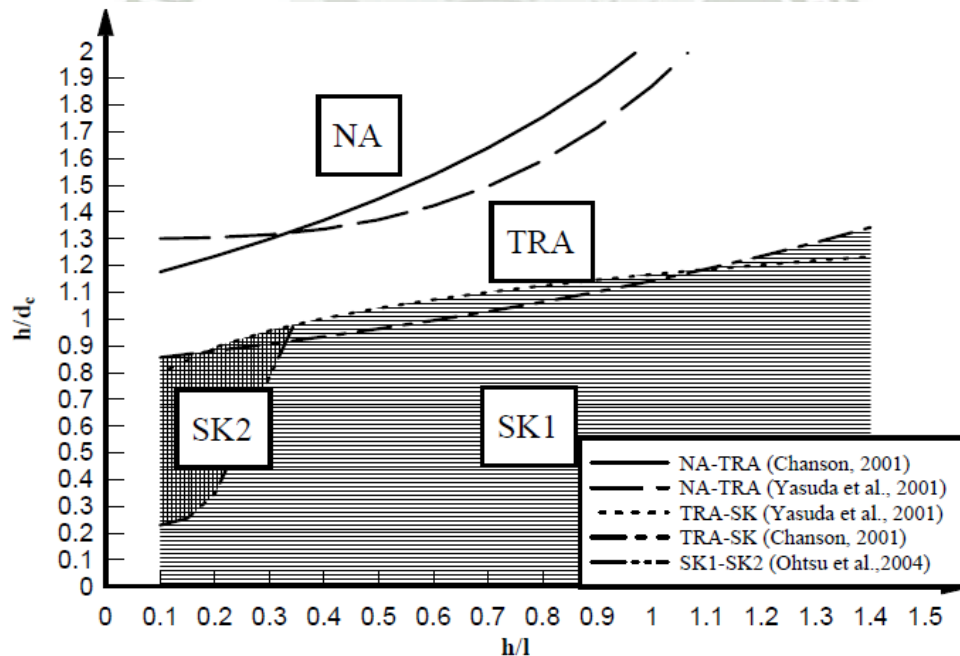


Figura. 41.-Predicción del tipo de flujo en rápidas escalonadas
Fuente: Hydraulic Design of Stepped Spillways and Downstream Energy Dissipators for Embankment Dams. A. Gonzales, H. Chanson, Pág. 230

Teniendo en consideración que la relación: altura (h)/ longitud de escalón (l).

$$\frac{h}{l} = 1.25$$

Se puede verificar que nos encontramos en el rango de flujo en transición (TRA) y flujo rasante (SK1) (Ohtsu Yasuda 2004).

5.2.1. Perfil de flujo

Como ya se ha explicado el tipo de flujo presente para los caudales y características del modelo, son la frontera del flujo en transición y el flujo rasante propiamente. El perfil de flujo se ha caracterizado mediante la medida del tirante de agua a lo largo del modelo de canal y aliviadero escalonado, con la ayuda de una regla metálica y reglas colocadas en las paredes de metacrilato del canal. Los datos obtenidos se presentan en la tabla N° 15, y los perfiles de flujo para caudales representativos se muestran en la figura N° 43.

Así mismo se muestra el ejemplo de cálculo para el caudal 11.087 l/s del flujo en transición, cuyo procedimiento es el mismo para los demás.

El perfil del flujo varía de acuerdo al caudal, los tipos de flujo presentes se describen a continuación:

Para caudales menores de $Q = 11.97 \text{ l/s}$ (modelo) se presenta flujo en transición (descrito en la sección 2.2.1.3), en los primeros escalones, el flujo tiende a adaptarse al perfil, después de los primeros escalones se caracteriza principalmente porque existen cavidades de aire entre los escalones y la lámina inferior de agua, lo que hace que sea bastante caótico, con muchos saltos de agua por consiguiente, una superficie que no presenta un patrón para distintos caudales. A pie de aliviadero presenta un salto de agua, debido a la velocidad con que llega el flujo (figura N° 40)

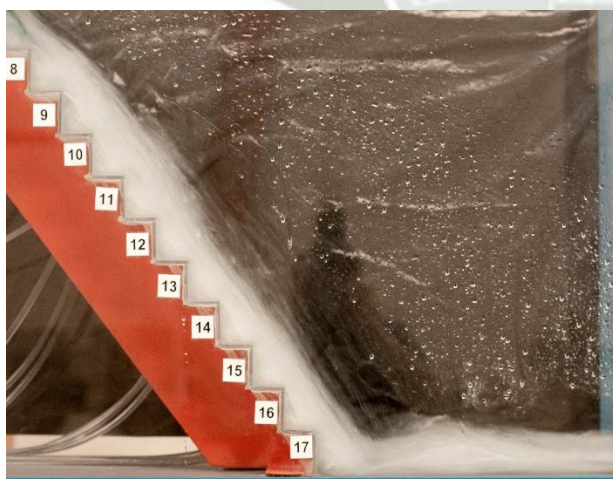


Figura. 42.-Salto de agua a pie de aliviadero (modelo, vista general) ^{PA}



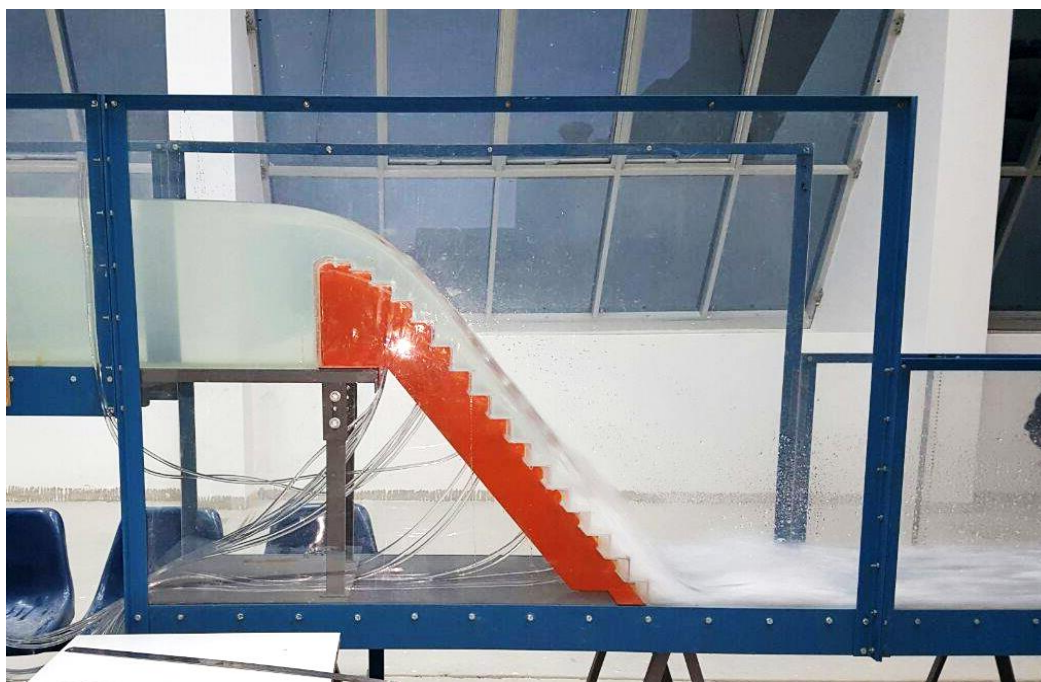
Figura. 43.-Salto de agua a pie de aliviadero (modelo) ^{PA}

Para caudales mayores iguales a $Q = 12.31l/s$ (modelo) se presenta el flujo denominado rasante, principalmente se caracteriza por no presentar cavidades de aire entre escalones y lámina de agua. En los primeros escalones este flujo también conserva la forma del perfil del aliviadero hasta que llega el punto de inicio de aireación, donde el flujo se torna un poco caótico, con presencia de salpicaduras de considerable tamaño, pasado este intervalo el flujo se estabiliza de cierta manera formando un perfil de flujo gradualmente variado, aguas abajo después que el flujo se estabiliza se forma un flujo denominado uniforme, con pocas salpicaduras y mantiene un tirante casi constante hasta el pie de aliviadero. Conforme el caudal aumenta el punto de inicio de aireación se retira aguas abajo, llegado en los últimos caudales a no presentarse sobre la estructura del escalonado.

Los puntos en los cuales se tomaron medidas a lo largo del eje "x" que coincide con el eje del modelo hidrodinámico, son los que se detallan en la tabla N°13, los puntos correspondientes a, t_1 , t_2 y t_3 , son las medidas que no poseen ubicación fija a lo largo del modelo, se tomaron para cada caudal a pie de aliviadero y obedecen a los tirantes del salto que se produce debido al cambio de pendiente.

PUNTO	Coordenada Eje "x"
Y_1	-4.127
Y_2	-2.627
Y_3	-1.127
Y_4	-0.677
Y_c	0.0412
Y_{p0}	0.0412
Y_{p1}	0.0812
Y_{p3}	0.1612
Y_{p6}	0.2812
Y_{p9}	0.4012
Y_{p12}	0.5212
Y_{p15}	0.6412
t_1	-
t_3	-
t_2	-
Y_5	1.873
Y_6	3.373

Tabla. 14.-Coordenadas de los puntos de medición de los parámetros (modelo)^{PA}


Figura. 44.-Fotografía del perfil característico del flujo(modelo)^{PA}

5.2.1.1. Esquema de perfiles de flujo sobre el modelo hidrodinámico

Caudal (l/s)	Nº:12	45.99	Nº:24	10.59	Nº:28	17.68	Nº:48	27.66	Nº:59	54.54
Punto / Cord.	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
Y ₁	-4.127	0.853	-4.127	0.776	-4.127	0.795	-4.127	0.819	-4.127	0.866
Y ₂	-2.627	0.853	-2.627	0.774	-2.627	0.794	-2.627	0.818	-2.627	0.868
Y ₃	-1.127	0.854	-1.127	0.776	-1.127	0.797	-1.127	0.820	-1.127	0.869
Y ₄	-0.677	0.856	-0.677	0.778	-0.677	0.798	-0.677	0.822	-0.677	0.871
Y _c	0.041	0.826	0.041	0.761	0.041	0.777	0.041	0.794	0.041	0.829
Y _{p0}	0.124	0.815	0.071	0.758	0.084	0.772	0.097	0.786	0.131	0.822
Y _{p1}	0.154	0.800	0.103	0.743	0.115	0.757	0.130	0.773	0.160	0.807
Y _{p3}	0.208	0.741	0.173	0.693	0.180	0.703	0.191	0.718	0.208	0.742
Y _{p6}	0.313	0.602	0.290	0.563	0.294	0.571	0.300	0.581	0.313	0.601
Y _{p9}	0.429	0.444	0.411	0.416	0.415	0.421	0.420	0.430	0.431	0.448
Y _{p12}	0.549	0.295	0.530	0.265	0.536	0.273	0.540	0.280	0.549	0.294
Y _{p15}	0.671	0.148	0.649	0.112	0.654	0.121	0.660	0.130	0.667	0.142
t ₁	0.759	0.034	0.731	0.013	0.738	0.016	0.745	0.026	0.754	0.038
t ₃	0.995	0.050	0.843	0.016	0.891	0.023	0.947	0.033	1.004	0.045
t ₂	1.231	0.037	0.954	0.012	1.045	0.015	1.150	0.025	1.254	0.055
Y ₅	1.873	0	1.873	0	1.873	0	1.873	0	1.873	0
Y ₆	3.373	0	3.373	0	3.373	0	3.373	0	3.373	0

Tabla. 15.- Coordenadas para el esquema de perfiles de flujo representativos (modelo, figura 42) ^{PA}

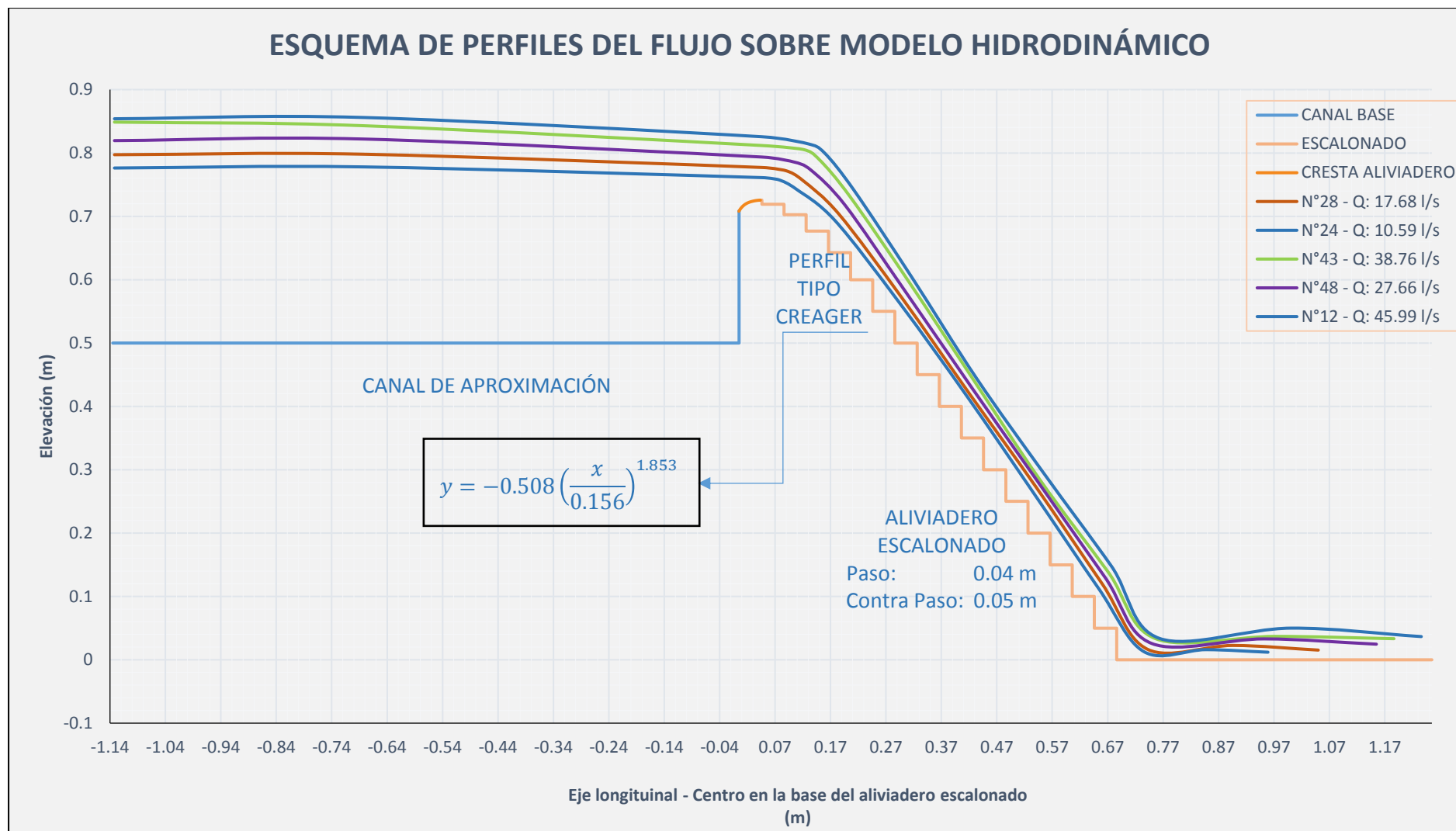


Figura. 45.-Esquema de perfiles de flujo sobre el modelo hidráulico (Coordenadas Tabla 14) ^{PA}

5.2.1.1.1. Flujo en transición

Según los límites establecidos los caudales de las campañas experimentales correspondientes a este tipo de flujo son los mostrados en las tablas 16 y 17, para el caudal y caudal específico respectivamente.

CAUDAL			
Escala	12	18	24
MODELO [l/s]	PROTOTIPO [m ³ /s]		
10.66	5.32	14.65	30.07
10.66	5.32	14.65	30.07
11.09	5.53	15.24	31.29
11.31	5.64	15.54	31.90
11.63	5.80	15.99	32.83

Tabla. 16.-Caudal en modelo para el flujo en transición^{PA}

CAUDAL ESPECÍFICO			
Escala	12	18	24
MODELO [m ² /s]	PROTOTIPO [m ² /s]		
0.023	0.97	1.78	2.74
0.023	0.97	1.78	2.74
0.024	1.01	1.85	2.85
0.025	1.03	1.89	2.91
0.026	1.06	1.94	2.99

Tabla. 17.-Caudal específico en modelo para el flujo en transición^{PA}

Cálculo del caudal:

Tabla resumen del ensayo N°1

Punto	Posición	Tirante	Área	Velocidad	Carga Presión	Carga Velocidad
	x	h	A	V	z	V ² /2g
	(m)	(m)	(m ²)	(m/s)	(m)	m
y ₁	-4.127	0.276	0.126	0.088	0.500	0.000
y ₂	-2.627	0.275	0.126	0.088	0.500	0.000
y ₃	-1.127	0.277	0.127	0.087	0.500	0.000
y ₄	-0.677	0.279	0.128	0.087	0.500	0.000
y _c	0.041	0.036	0.016	0.673	0.726	0.023
y _{p0}	0.073	0.034	0.016	0.713	0.726	0.026
y _{p1}	0.105	0.026	0.012	0.932	0.719	0.044

y_{p3}	0.174	0.018	0.008	1.346	0.677	0.092
y_{p6}	0.290	0.014	0.007	1.691	0.550	0.146
y_{p9}	0.411	0.015	0.007	1.616	0.400	0.133
y_{p12}	0.531	0.016	0.007	1.531	0.250	0.119
y_{p15}	0.652	0.017	0.008	1.469	0.100	0.110
t_1	0.734	0.009	0.004	2.693	0.000	0.370
t_3	0.837	0.020	0.009	1.212	0.000	0.075
t_2	0.939	0.010	0.005	2.423	0.000	0.299
y_5	1.873	0.015	0.007	1.652	0.000	0.139
y_6	3.373	0.021	0.009	1.173	0.000	0.070

Tabla. 18.-Tabla resumen del ensayo N°1-Q=11.088 l/s, correspondiente a flujo en transición^{PA}

Se realiza el cálculo para el caudal correspondiente al ensayo N° 1.

Datos iniciales

$$P = 0.226 \text{ m}$$

$$L = 0.458 \text{ m}$$

$$g = 9.81 \text{ m}$$

$$H_o = 0.156 \text{ m}$$

Valor del tirante y_4

$$y_4 = 0.279 \text{ m}$$

Cálculo del caudal correspondiente al ensayo N° 1

Altura H_{Total} , correspondiente al promedio de las medidas del tirante tomadas para el punto Y_4 :

$$H_{Total}: 0.279 \text{ m}$$

Se obtiene la altura de la lámina de agua encima de la cresta del aliviadero:

$$H_o = y_4 - P$$

$$H_o = 0.279 - 0.226$$

$$H_o = 0.054$$

$$P/H_o = 0.226/0.054$$

$$P/H_o = 4.197$$

Como el valor de P/H_e es mayor a 2.5, según la ecuación N° 33, se tiene

$$C = 2.18$$

Cálculo del caudal inicial

$$Q = CLH^{3/2}$$

$$Q = (2.18)(0.458)(0.054)^{3/2}$$

$$Q = 12.43 \text{ l/s}$$

Determinación de H_a Carga de velocidad aproximada del flujo

$$h_a = \left(\frac{Q}{(P + H_o)L} \right)^2 (2g)^{-1}$$

$$h_a = \left(\frac{0.0612.43 * 10^3}{(0.226 + 0.054)0.4575} \right)^2 (2 * 9.81)^{-1}$$

$$h_a = 10.09 \text{ E-4}$$

Diferencia entre la carga de agua sobre la cresta y la carga de la velocidad aproximada del flujo.

$$H_e = H_o - h_a$$

$$H_e = 0.054 - 10.09 \text{ E-4}$$

$$H_e = 0.053 \text{ m}$$

Cálculo de H_e/H_o para aplicar el factor de corrección, debido a que, la altura de la lámina de agua presente en el ensayo es menor a la del diseño.

$$H_e/H_o = 0.054/0.156$$

$$H_e/H_o = 0.34$$

Mediante la gráfica (Coeficiente de descarga para alturas de lámina de agua sobre la coronación diferentes a las de diseño) se calcula el valor de C_o' , que también es posible calcular gracias a la ecuación:

$$C_o' = 0.212 \left(\frac{H_e}{H_o} \right)^{2/3} + 0.788$$

$$C_o' = 0.892$$

Cálculo del coeficiente de gasto corregido C_{o1}

$$C_{o1} = (C'_o)(C_o)$$

$$C_{o1} = (0.885)(2.18)$$

$$C_{o1} = 1.945$$

Cálculo del caudal corregido

$$Q = C_{o1} L H_o^{3/2}$$

$$Q = (1.945)(0.458)(0.054)^{3/2}$$

$$Q = 11.087 \frac{l}{s} \approx 11.09 \text{ l/s}$$

5.2.1.1.2. Flujo Rasante

Según los límites para el umbral de cambio el flujo rasante se da para caudales mayores 11.95 l/s según Amador Sánchez Dolz (2005) y 12.13 l/s según Ohtsu Yasuda, sin embargo, en las campañas experimentales se observó que este tipo de flujo comienza a partir de 12.31 l/s.

Los caudales pertenecientes al flujo rasante ensayados en el modelo se presentan en la tabla N° 18

CAUDALES PARA FLUJO RASANTE			
Escala	12	18	24
MODELO [l/s]	PROTOTIPO [m³/s]		
12.31	6.14	16.91	34.72
12.73	6.35	17.50	35.93
13.42	6.70	18.45	37.88
14.40	7.18	19.80	40.64
15.04	7.50	20.67	42.43
15.62	7.79	21.47	44.08
15.87	7.92	21.81	44.78
16.25	8.10	22.33	45.84
16.37	8.17	22.50	46.20
17.20	8.58	23.64	48.53
17.78	8.87	24.44	50.18
19.17	9.56	26.35	54.09
19.64	9.80	27.00	55.43
20.19	10.07	27.75	56.96

CAUDALES PARA FLUJO RASANTE			
20.60	10.28	28.32	58.13
21.33	10.64	29.32	60.19
21.96	10.96	30.19	61.98
21.96	10.96	30.19	61.98
23.14	11.54	31.81	65.31
23.58	11.76	32.41	66.54
24.90	12.42	34.23	70.28
25.13	12.53	34.54	70.91
25.60	12.77	35.18	72.23
26.29	13.11	36.13	74.18
26.67	13.31	36.67	75.27
26.75	13.34	36.77	75.49
27.38	13.66	37.63	77.25
27.69	13.81	38.06	78.13
27.81	13.87	38.22	78.47
27.93	13.93	38.39	78.80
30.20	15.07	41.51	85.22
30.32	15.13	41.68	85.56
30.69	15.31	42.18	86.59
30.93	15.43	42.52	87.28
31.55	15.74	43.36	89.02
33.92	16.92	46.62	95.71
34.81	17.36	47.84	98.21
36.61	18.26	50.32	103.30
36.74	18.33	50.50	103.66
38.18	19.04	52.48	107.73
38.70	19.31	53.20	109.22
38.70	19.31	53.20	109.22
38.97	19.44	53.57	109.97
40.17	20.04	55.22	113.36
40.44	20.17	55.59	114.12
42.48	21.19	58.39	119.87
43.03	21.46	59.15	121.42
43.30	21.60	59.53	122.19
44.41	22.15	61.05	125.32
45.16	22.53	62.08	127.43
45.81	22.85	62.98	129.28
50.70	25.29	69.69	143.07
52.17	26.03	71.72	147.23
54.26	27.07	74.59	153.12

Tabla. 19.- Caudales para el flujo rasante en modelo ^{PA}

CAUDAL ESPECÍFICO PARA FLUJO RASANTE			
Escala	12	18	24
MODELO [m ² /s]	PROTOTIPO [m ² /s]		

CAUDAL ESPECÍFICO PARA FLUJO RASANTE			
0.027	1.309	2.054	3.701
0.028	1.742	2.125	4.927
0.029	1.375	2.241	3.888
0.031	1.366	2.404	3.864
0.033	1.834	2.510	5.188
0.034	1.487	2.608	4.207
0.035	1.563	2.649	4.420
0.036	1.442	2.712	4.078
0.036	1.785	2.733	5.048
0.038	1.938	2.871	5.482
0.039	1.872	2.968	5.294
0.042	2.527	3.200	7.146
0.043	2.103	3.279	5.948
0.044	1.996	3.370	5.644
0.045	2.283	3.439	6.458
0.047	4.607	3.560	13.030
0.048	2.263	3.666	6.400
0.048	1.476	3.666	4.175
0.051	2.487	3.863	7.035
0.052	1.996	3.936	5.644
0.054	2.431	4.157	6.875
0.055	2.537	4.195	7.177
0.056	2.142	4.272	6.060
0.057	2.866	4.388	8.107
0.058	2.326	4.453	6.578
0.058	2.811	4.466	7.949
0.060	2.389	4.570	6.756
0.061	2.424	4.622	6.855
0.061	3.469	4.642	9.811
0.061	2.755	4.661	7.793
0.066	2.516	5.041	7.116
0.066	2.788	5.062	7.887
0.067	3.082	5.122	8.716
0.068	0.000	5.163	0.000
0.069	3.517	5.266	9.947
0.074	3.326	5.661	9.408
0.076	2.744	5.810	7.761
0.080	3.541	6.110	10.015
0.080	3.162	6.132	8.945
0.083	0.000	6.372	0.000
0.085	3.910	6.461	11.058
0.085	3.650	6.461	10.324
0.085	3.675	6.505	10.393
0.088	3.338	6.706	9.441

CAUDAL ESPECÍFICO PARA FLUJO RASANTE			
0.088	0.000	6.750	0.000
0.093	4.103	7.091	11.606
0.094	4.163	7.182	11.774
0.095	3.517	7.228	9.947
0.097	3.935	7.414	11.129
0.099	4.035	7.538	11.414
0.100	0.000	7.648	0.000
0.111	4.741	8.463	13.409
0.114	4.930	8.709	13.945
0.119	1.157	9.058	3.272

Tabla. 20.-Caudales específicos para flujo rasante en modelo ^{PA}

5.2.1.2.Velocidades calculadas con el calado promedio

A Partir del cálculo del caudal, se obtiene la velocidad. Para efectos de comparación se calculó la velocidad con el método del flotador, encontrando que las velocidades resultantes son muy parecidas a las calculadas a partir del caudal, bajo esta premisa se calcularon todas las velocidades con la ecuación de continuidad.

Se muestra el procedimiento para el ensayo N° 1:

Velocidad para el punto y_5 : ($x = 1.83 \text{ m}$)

$$Q = 11.087 \text{ l/s}$$

$$y_5 = 0.016 \text{ m}$$

$$b = 0.458 \text{ m}$$

$$Q = V * A$$

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{11.087(10E-4)}{0.015(0.458)}$$

$$V = 1.652 \text{ m/s}$$

5.2.1.3.Velocidades calculadas a pie de aliviadero

En la figura 43 se observan los valores de velocidad obtenidos de la campaña experimental, el cálculo para los tres últimos caudales, difieren de la tendencia, esto se puede deber a la velocidad desarrollada aguas arriba de la cresta del aliviadero.

Los datos obtenidos concuerdan con los mostrados por Sorensen (1984), presentados en el capítulo del marco teórico (sección 2.2.4).

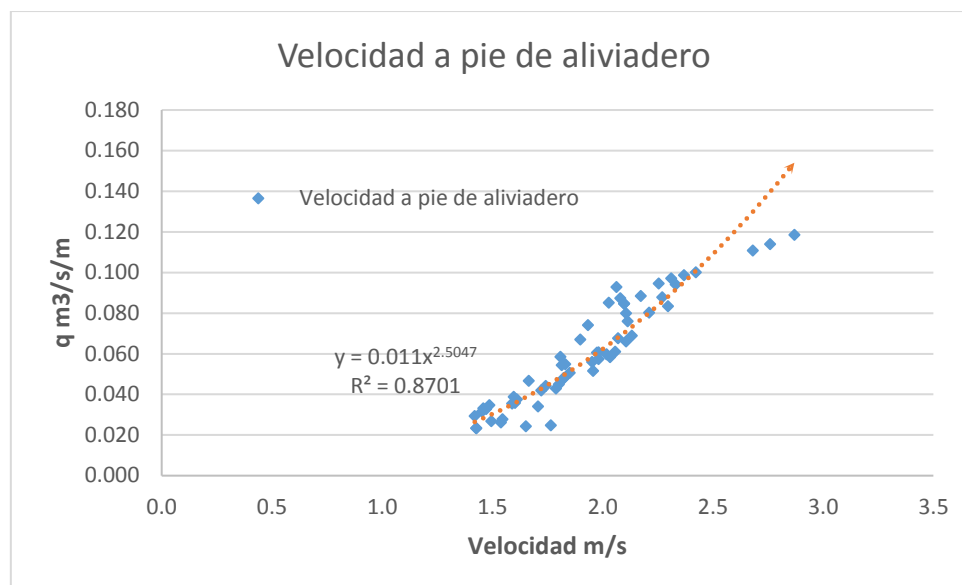


Figura. 46.- Velocidades a pie de aliviadero (m/s). Ubicación en el punto y_5 (1.873 m. eje "x"). Línea de tendencia exponencial ^{PA}

5.2.1.4. Cargas piezométricas promedio

Obtenidos de las campañas experimentales, se muestran las presiones representativas a lo largo del aliviadero, así mismo se muestran gráficas para visualizar el comportamiento con claridad.

Los piezómetros se colocaron en grupos de tres en la huella del primer, tercer, sexto, noveno, doceavo y quinceavo escalón, haciendo un total de 18 piezómetros.

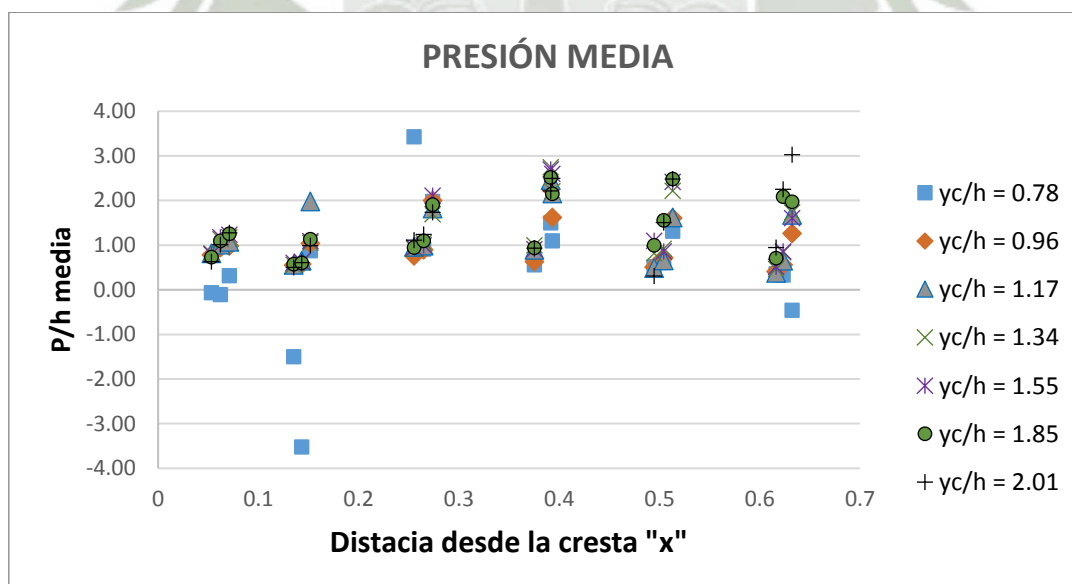


Figura. 47.-Cargas piezométricas a lo largo del aliviadero escalonado ^{PA}

Se han escogido presiones representativas para diferentes caudales, a fin de visualizar el comportamiento de la presión en cada escalón donde se tomaron las medidas. Los datos escogidos (de manera aleatoria) se muestran en la tabla 20 y 21

PRESIONES A LO LARGO DEL ALIVIADERO ESCALONADO									
Escalón	1			3			6		
Eje x	0.053	0.062	0.071	0.135	0.143	0.152	0.255	0.265	0.274
y_c/h	P_1/h	P_2/h	P_3/h	P_4/h	P_5/h	P_6/h	P_7/h	P_8/h	P_9/h
0.8	0.16	-0.06	0.00	-1.48	-4.13	0.92	0.75	0.86	1.94
1.0	0.40	0.24	0.46	-1.50	-3.06	0.95	0.80	1.20	2.31
1.2	0.82	1.02	1.08	0.56	0.65	1.98	0.96	0.99	1.82
1.4	0.82	1.12	1.08	0.58	0.67	1.04	0.21	1.20	1.70
1.6	0.80	1.18	1.24	0.60	0.63	1.09	0.95	1.00	2.11
1.8	0.72	1.10	1.25	0.51	0.57	1.13	1.07	1.27	1.05
2.0	0.64	1.02	1.28	0.50	0.61	0.99	1.11	1.24	1.74

Tabla. 21.- Presiones a lo largo del aliviadero, escalones 1, 3 y 6 ^{PA}

PRESIONES A LO LARGO DEL ALIVIADERO ESCALONADO									
Escalón	9			12			15		
Eje x	0.375	0.392	0.393	0.495	0.504	0.513	0.616	0.623	0.632
y_c/h	P_{10}/h	P_{11}/h	P_{12}/h	P_{13}/h	P_{14}/h	P_{15}/h	P_{16}/h	P_{17}/h	P_{18}/h
0.8	0.58	1.21	1.32	6.46	6.38	5.59	12.58	12.60	12.40
1.0	0.70	2.21	1.61	6.51	6.26	5.48	12.58	12.39	11.64
1.2	0.90	2.46	2.16	6.51	6.34	5.38	12.62	12.35	11.32
1.4	0.85	2.65	2.15	6.11	6.39	4.54	12.52	12.10	11.60
1.6	0.91	2.70	2.60	5.91	6.14	4.58	12.48	12.14	11.39
1.8	0.85	2.39	2.56	6.11	5.67	5.62	12.16	11.90	10.82
2.0	0.93	2.22	2.50	6.69	5.49	5.78	12.05	10.75	9.97

Tabla. 22.- Presiones a lo largo del aliviadero, escalones 9, 12 y 15 ^{PA}

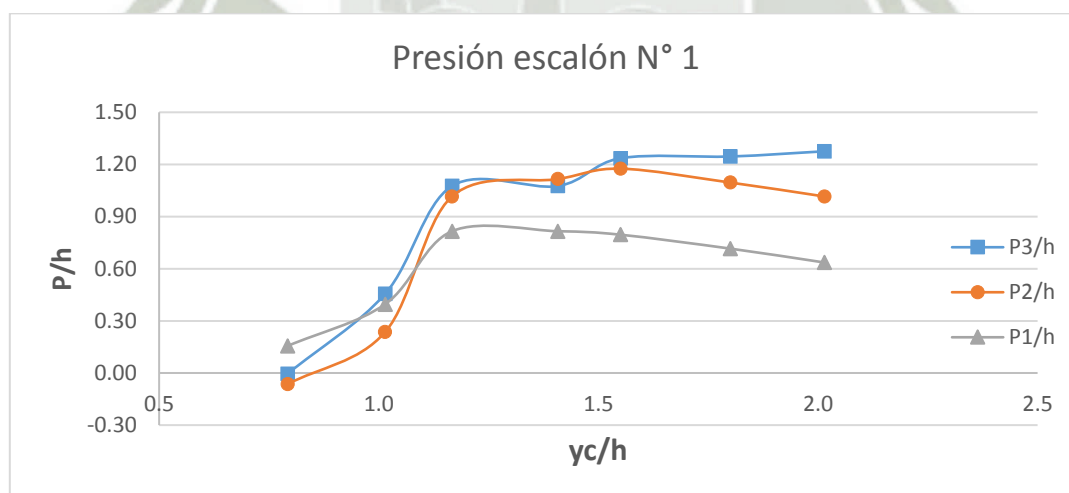


Figura. 48.-Presión en la huella del escalón N° 1 piezómetros colocados a 8, 17 y 25mm. Desde la cara del contrapaso inmediatamente superior, Relación P/h con el parámetro adimensional y_c/h ^{PA}

Como se observa en la figura, la presión a lo largo del escalón tiende a incrementarse conforme nos acercamos al contrapaso aguas abajo (final de la huella). Vemos que se presentan presiones positivas en toda la huella, la carga de las presiones P_1/h , P_2/h y P_3/h varía en forma proporcional al aumento del caudal, esto tiene sentido ya que, el tirante de agua que llega al escalón aumenta con el caudal

circulante. Con caudales pequeños se observa que la presión en la huella es mayor para el primer punto de medición, esto se debe a que, la lámina de flujo es menor a la de diseño, por lo tanto, tiende a pegarse al perfil del aliviadero, y con el cambio de dirección el flujo pasa con menor fuerza por los puntos dos y tres. Conforme aumentan los caudales y nos acercamos a la carga de lámina de agua de diseño, la presión en el punto 3 aumenta con respecto al primer y segundo punto.

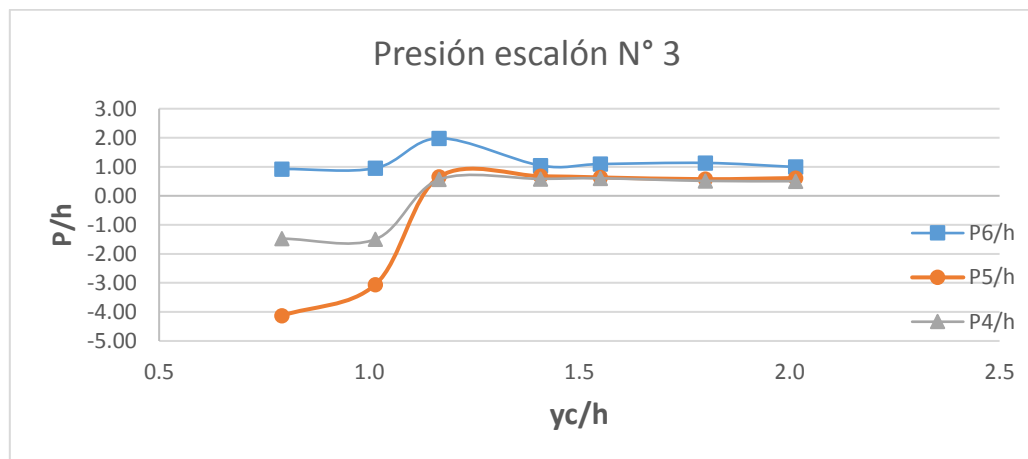


Figura. 49.-Presión en la huella del escalón N° 3, piezómetros colocados a 10, 18 y 26.5 mm. desde la cara del contrapaso inmediatamente superior, Relación P/h con el parámetro adimensional yc/h ^{PA}

Dentro de los caudales ensayados, para caudales bajos, dado que la altura de la contrahuella del escalón 3 es mayor se producen cambios en la dirección del flujo y aparecen los primeros vórtices de recirculación, si bien no existe aireación los vórtices ya empiezan a funcionar aun sin la presencia de burbujas, debido a los giros que producen, en el punto 5 el flujo que va girando tiende a ir en contra de la dirección del fluido, por lo que se producen presiones negativas. Conforme el caudal aumenta las presiones se estabilizan yendo de menor a mayor a medida que se acercan a la caída. (Figura N° 49)

Conforme el caudal desciende por el aliviadero, antes del punto de inicio de aireación se tiene un flujo gradualmente variado, el cual no sufre muchas perturbaciones, por lo que se observa que la presión aumenta con respecto a los escalones superiores, sin embargo, no cambia abruptamente conforme aumenta el caudal. Los vórtices de recirculación también están presentes por lo que se tiene mayores lecturas en el punto más alejado de la huella aguas arriba del aliviadero (P_9/h). (Figura N°50)

Para los caudales bajos es el punto donde aproximadamente se produce la entrada de aire, por lo que, al comienzo de las curvas no se observa gran variación con respecto a los escalones superior, conforme el caudal aumenta el punto de inicio de aireación se traslada aguas abajo, por lo que, al estar en la zona no aireada no existen perturbaciones por parte de las burbujas de aire. Al final de la gráfica para los valores de (yc/h) más altos se observa una ligera disminución en las lecturas del piezómetro central, debido a que el flujo se estabiliza y tiene un comportamiento parecido al de escalones aguas arriba. (Figura N° 51)

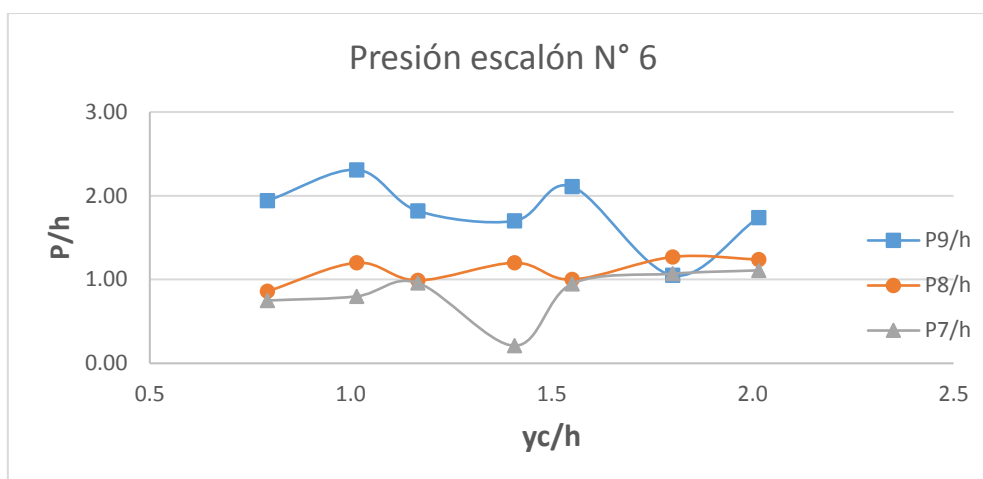


Figura. 50.-Presión en la huella del escalón N° 6, piezómetros colocados a 10, 19.5 y 28.5 mm. desde la cara del contrapaso inmediatamente superior, Relación P/h con el parámetro adimensional yc/h ^{PA}

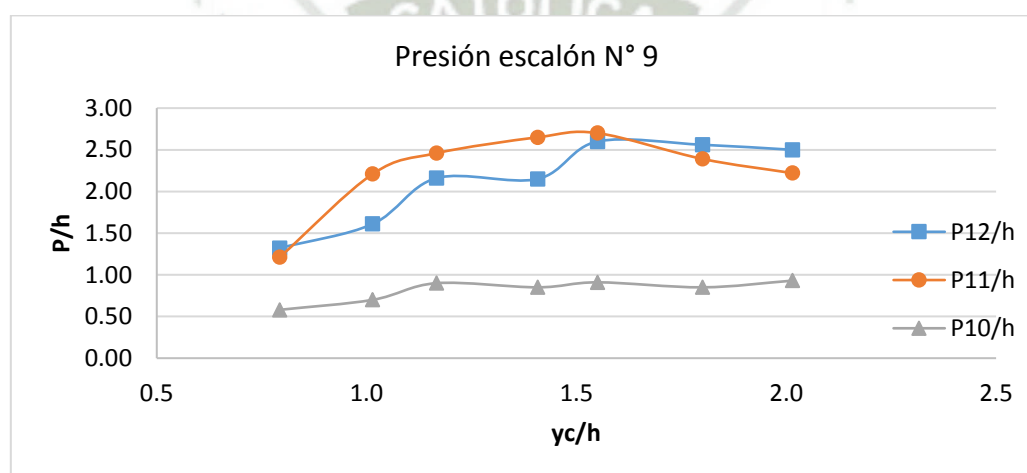


Figura. 51.-Presión en la huella del escalón N° 9, piezómetros colocados a 10, 26.5 y 28 mm. desde la cara del contrapaso inmediatamente superior, Relación P/h con el parámetro adimensional yc/h ^{PA}

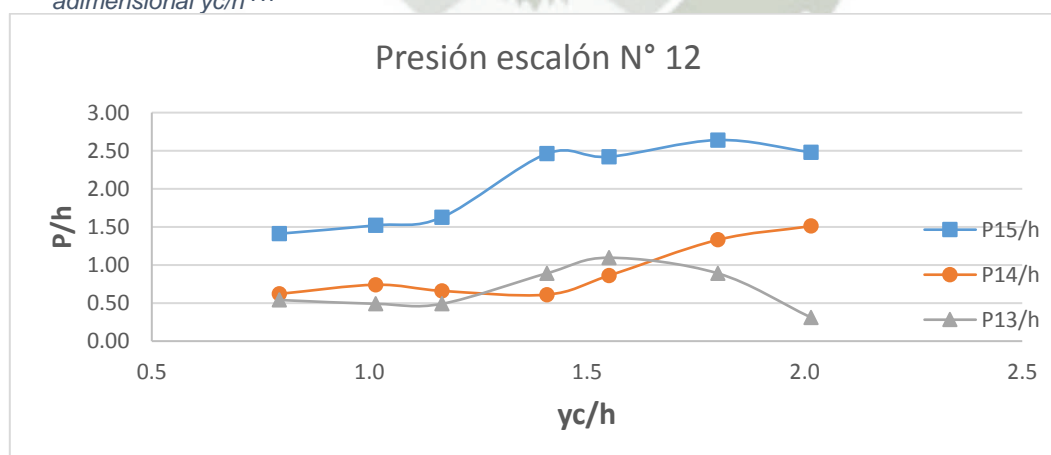


Figura. 52. -Presión en la huella del escalón N° 12, piezómetros colocados a 9.5, 19 y 28 mm. desde la cara del contrapaso inmediatamente superior, Relación P/h con el parámetro adimensional yc/h ^{PA}

Si bien la presión no varía demasiado con los escalones aguas arriba, para este punto se nota la diferencia que existe entre la presión de los puntos trece y catorce con el punto quince, este último muestra mayores valores, debido también al flujo de recirculación. Para los valores de $y_c/h = 1.4$ y $y_c/h = 1.6$, la presión es mayor en el punto 13, debido a que, en este punto ocurre la entrada de aire, distorsionando el comportamiento normal del flujo de recirculación. (Figura N° 52)

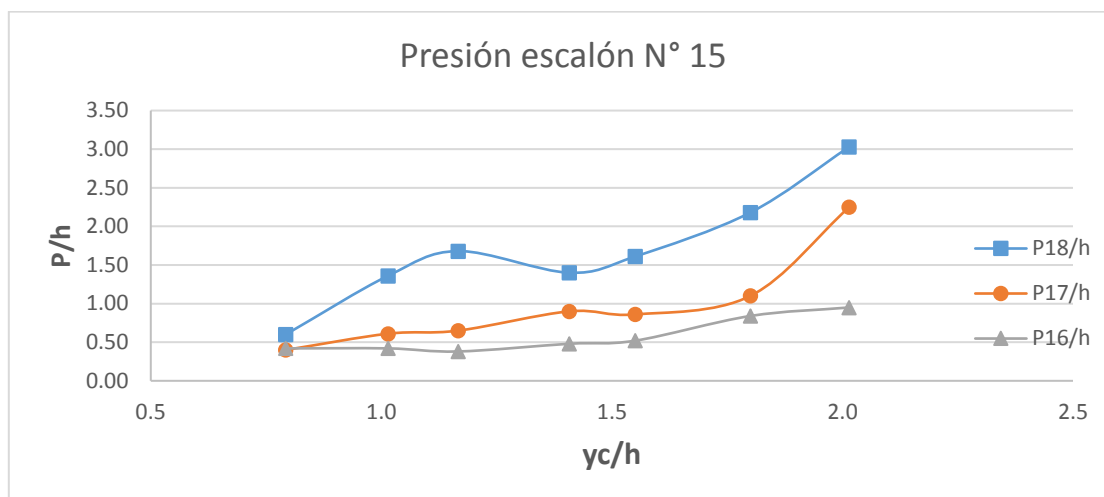


Figura. 53.-Presión en la huella del escalón N°, 15 piezómetros colocados a 11, 18 y 27 mm. desde la cara del contrapaso inmediatamente superior, Relación P/h con el parámetro adimensional y_c/h^{PA}

Para el escalón 15 se observa un comportamiento similar al de los escalones doce y nueve, para el último punto de medición las alturas son mayores que el resto de las mediciones, sin embargo, esto no es así para todos los caudales, se debe tener en cuenta que para caudales del rango de 40 l/s no se alcanzó en punto de inicio de aireación, por lo que el comportamiento corresponde a la zona no aireada. (Figura N° 53)

5.2.1.5.Cálculo de la disipación de energía mediante la ecuación de Bernoulli

Se aplica la ecuación de Bernoulli a una línea de corriente que va por el eje de fondo del aliviadero escalonado para encontrar la disipación de energía, se toma como referencia dos puntos de control, la coordenada del eje "x" del punto y_c (punto más alto, cresta) y la coordenada del punto y_5 (ubicado aguas abajo del aliviadero, lo suficiente para tomar una medida fiable del tirante).

$$E_c = z_c + h_c + \frac{V_c^2}{2g}$$

Donde:

E_c : Carga de energía en el punto "c".

z_c : Carga de posición en el punto “c”. Corresponde a la coordenada del eje “y”

$$z_c = 0.276 \text{ m}$$

h_c : Carga de agua en el punto “c”. Corresponde al promedio de los tirantes medidos en el punto “c”.

Tabla: Cálculo de la variación de la energía del ensayo N°1

Punto	Posición	Tirante	Carga Presión	Carga Velocidad	Ecuación de Bernoulli	
	x	h	z	$V^2/2g$	Energía remanente	% Energía disipada
	(m)	(m)	(m)	m	(m)	(%)
y ₁	-4.127	0.276	0.500	0.000	0.776	
y ₂	-2.627	0.275	0.500	0.000	0.775	
y ₃	-1.127	0.277	0.500	0.000	0.778	
y ₄	-0.677	0.279	0.500	0.000	0.780	
y _c	0.041	0.036	0.726	0.023	0.785	
y _{p0}	0.072	0.034	0.726	0.026	0.785	
y _{p1}	0.105	0.026	0.719	0.044	0.790	
y _{p3}	0.174	0.018	0.677	0.092	0.787	
y _{p6}	0.293	0.014	0.550	0.146	0.710	
y _{p9}	0.413	0.015	0.400	0.133	0.548	
y _{p12}	0.531	0.016	0.250	0.119	0.385	
y _{p15}	0.655	0.017	0.100	0.110	0.226	
t ₁	0.738	0.009	0.000	0.370	0.379	51.75 %
t ₃	0.845	0.020	0.000	0.075	0.095	87.91 %
t ₂	0.953	0.010	0.000	0.299	0.309	60.58 %
y ₅	1.873	0.015	0.000	0.139	0.154	80.40 %
y ₆	3.373	0.021	0.000	0.070	0.091	88.43 %

Tabla. 23.-Cálculo de la energía disipada mediante el trinomio de Bernoulli, ensayo N°1, Q= 11.087 l/s (modelo)^{PA}

Cálculo de la energía para el punto y₅ (E_{y_5})

$$h_c = 0.036 \text{ m}$$

$\frac{V_c^2}{2g}$: Carga de velocidad en el punto “c”. Se calcula a partir del caudal circulante.

$$A = 0.036 * 0.458$$

$$A = 0.016 \text{ m}^2$$

$$Q = 0.0111 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V = 0.0111/0.016$$

$$V_c = 0.673 \text{ m/s}$$

$$\frac{V_c^2}{2g} = \frac{0.673^2}{2 * 9.81} = 0.023 \text{ m}$$

Por lo tanto:

$$E_c = 0.276 + 0.036 + 0.023$$

$$E_c = 0.785 \text{ m}$$

$$E_{y_5} = z_{y_5} + h_{y_5} + \frac{V_{y_5}^2}{2g}$$

Donde:

z_{y_5} : Carga de posición en el punto “ y_5 ”.

$$z_{y_5} = 0.00$$

h_c : Carga de agua en el punto “ h_{y_5} ”.

$$h_{y_5} = 0.015 \text{ m}$$

$\frac{V_{y_5}^2}{2g}$: Carga de velocidad en el punto “ y_5 ”. Se calcula a partir del caudal circulante.

$$A = 0.015 * 0.458$$

$$A = 0.007 \text{ m}^2$$

$$Q = 0.0111 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V = 0.0111/0.007$$

$$V_{y_5} = 1.173 \text{ m/s}$$

$$\frac{V_c^2}{2g} = \frac{1.173^2}{2 * 9.81} = 0.139 \text{ m}$$

Por lo tanto:

$$E_{y_5} = 0.00 + 0.015 + 0.139$$

$$E_{y_5} = 0.154 \text{ m}$$

Variación de la energía:

Tabla Cálculo de la variación de la energía del ensayo N°1

$$\Delta E = \left(\frac{E_c - E_5}{E_c} \right) \cdot 100\%$$

$$\Delta E = \left(\frac{0.785 - 0.154}{0.785} \right) \cdot 100\%$$

$$\Delta E = 80.40\%$$

5.2.1.6. Cálculo de la disipación de energía mediante la ecuación para flujo rasante

Consideramos que el flujo rasante ocurre para caudales mayores a 12.31 l/s en el modelo:

Se muestra la tabla del cálculo de la energía disipada mediante la ecuación de flujo rasante para el ensayo N° 15 de la campaña experimental.

Punto	Posición	Tirante	Velocidad	Ecuación de Analítica	
	x	h	v	f	% Energía disipada
	(m)	(m)	(m/s)	(adim)	$\Delta H/H_{\max}$
y ₁	-4.127	0.281	0.096		
y ₂	-2.627	0.282	0.095		
y ₃	-1.127	0.282	0.095		
y ₄	-0.677	0.283	0.095		
y _c	0.041	0.037	0.727		
y _{p0}	0.072	0.034	0.803		
y _{p1}	0.105	0.029	0.944		
y _{p3}	0.174	0.022	1.213		
y _{p6}	0.293	0.021	1.291		
y _{p9}	0.413	0.020	1.323		
y _{p12}	0.531	0.016	1.647		
y _{p15}	0.655	0.021	1.301		
t ₁	0.738	0.013	2.123	0.545	85.01 %
t ₃	0.845	0.018	1.494		
t ₂	0.953	0.014	1.968		
y ₅	1.873	0.018	1.494		
y ₆	3.373	0.022	1.223		

Tabla. 24.-Cálculo de la energía disipada mediante la ecuación de flujo rasante, ensayo N° 15 ^{PA}

Se utiliza la ecuación N°22, presentada en el capítulo 2, sección 2.2.5.3.2

$$PED_{01} = 1 - \frac{\left(\frac{f}{8 \operatorname{sen} \alpha}\right)^{1/3} \cos \alpha + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \operatorname{sen} \alpha}\right)^{-2/3}}{E_0}$$

$$f = \frac{8 \cdot g \cdot y_p \cdot \operatorname{sen} \alpha}{V^2}$$

$$f = \frac{8 \cdot g \cdot y_p \cdot \operatorname{sen} \alpha}{V^2}$$

$$V = \frac{\sum_{i=y_{p3}}^{n=y_{15}} V_i}{5}$$

$$V = 1.355 \text{ m/s}$$

$$f = \frac{8 \cdot 9.81 \cdot 0.016 \cdot \operatorname{sen} \alpha}{1.355^2}$$

$$f = 0.545$$

$$PED_{01} = 1 - \frac{\left(\frac{0.545}{8 \operatorname{sen}(53.1)}\right)^{1/3} \cos \alpha + \frac{1}{2} \left(\frac{0.545}{8 \operatorname{sen}(53.1)}\right)^{-2/3}}{\frac{0.726}{0.042} + \frac{3}{2}}$$

$$PED_{01} = 0.85$$

$$PED_{01} = 85.01\%$$

5.2.2. Análisis de resultados de los datos procesados

A partir de la observación y toma de datos del laboratorio, se han podido caracterizar los tipos de flujo obtenidos, el flujo en transición presente en los menores caudales ($Q < 12.31 \text{ l/s}$), al que le corresponde un valor de $\left(\frac{y_c}{h} = 0.84\right)$, este valor viene a ser el umbral de cambio entre el tipo de flujo en transición a flujo rasante.

5.2.2.1. Análisis de resultados para régimen de flujo en transición

5.2.2.1.1. Perfil de flujo en transición

En el flujo en transición se observaron que existían algunas cavidades de aire entre el contrapaso y la parte inferior del chorro que cae, esto se puede observar en la figura 54. Además, existían fuertes salpicaduras que sobrepasaban la altura de los escalones, haciendo difícil la toma de datos, esto se puede visualizar en la figura 55.

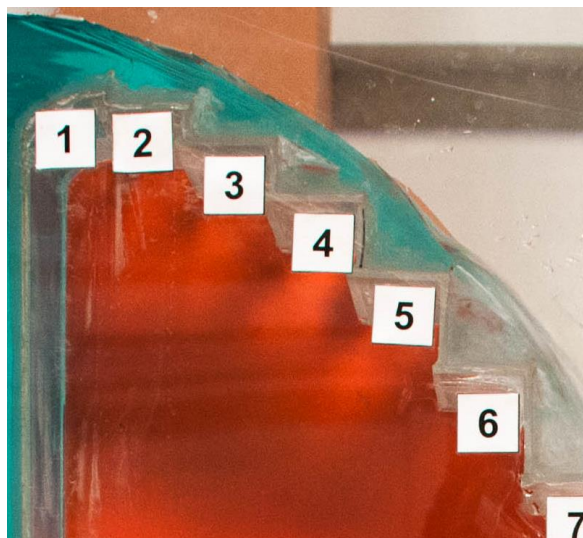


Figura. 54.- Cavity de aire, presente en el rango de caudales de flujo en transición (tercer escalón) ($Q=11.64$ l/s modelo) [Fotografía: Rodríguez C.]

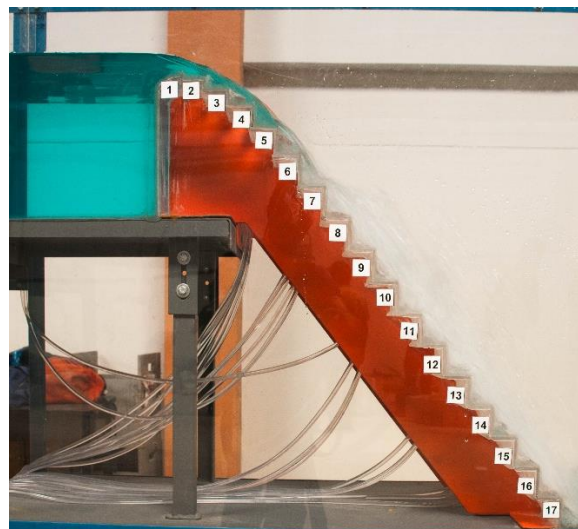


Figura. 55.-Perfil de flujo en transición. Flujo caótico, se visualiza salpicaduras pronunciadas ($Q=11.64$ l/s modelo) [Fotografía: Rodríguez C.]

5.2.2.1.2. Entrada de aire para flujo en transición

Con respecto a la entrada de aire solo se puede precisar que se registraron datos de manera visual, ya que para localizar el punto exacto donde la capa límite llega a la superficie es necesario equipo de alta tecnología que permita cuantificar la cantidad de aire contenida en el agua, es así que para determinar el punto de inicio de aireación se trabaja con el tirante y_{90} , que es el punto donde la concentración del aire es del 90%, y la media de concentración de aire desde el punto de inicio de aireación hasta el pie de aliviadero oscila entre 30 y 50%.

En base a la observación podemos afirmar que para el flujo en transición para caudales específicos comprendidos entre 0.023 y 0.025 m^2/s ($0.023 < q < 0.025$ y $10.66 < Q < 11.31$ l/s) la capa límite se sale a superficie (lámina externa del flujo) antes del octavo escalón, a una distancia aproximada de 0.28 m en el eje x a partir de la cresta del aliviadero.

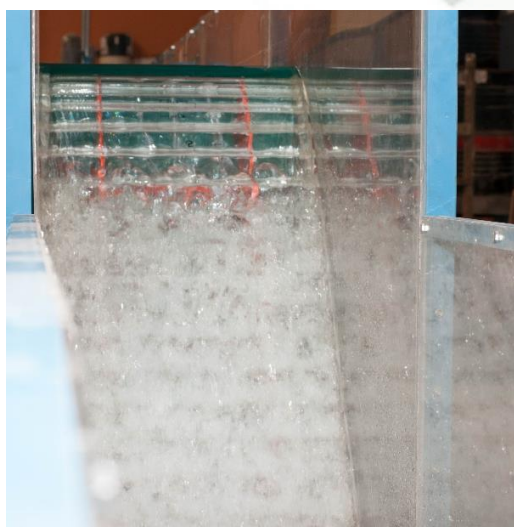


Figura. 56.-Entrada de aire en el flujo en transición [Fotografía: Rodríguez C.]



Figura. 57.-Entrada de aire en el flujo en transición (vista general) [Fotografía: Rodríguez C.]

5.2.2.1.3. Disipación de energía – Flujo en Transición

La disipación de energía se ha calculado en base al trinomio de Bernoulli, tal como se muestra en la sección 4.2.1.6 para el caudal $Q=11.09 \text{ m}^3/\text{s}$. Se han trabajado con cuatro caudales para este tipo de flujo.

En la figura 53 se muestra la relación de la disipación de energía para el rango de caudales que tienen un comportamiento de flujo en transición.

A pesar que la correlación que muestra la figura 54 describe un comportamiento lineal, no establecemos un patrón de comportamiento por estar trabajando sin todos los datos.

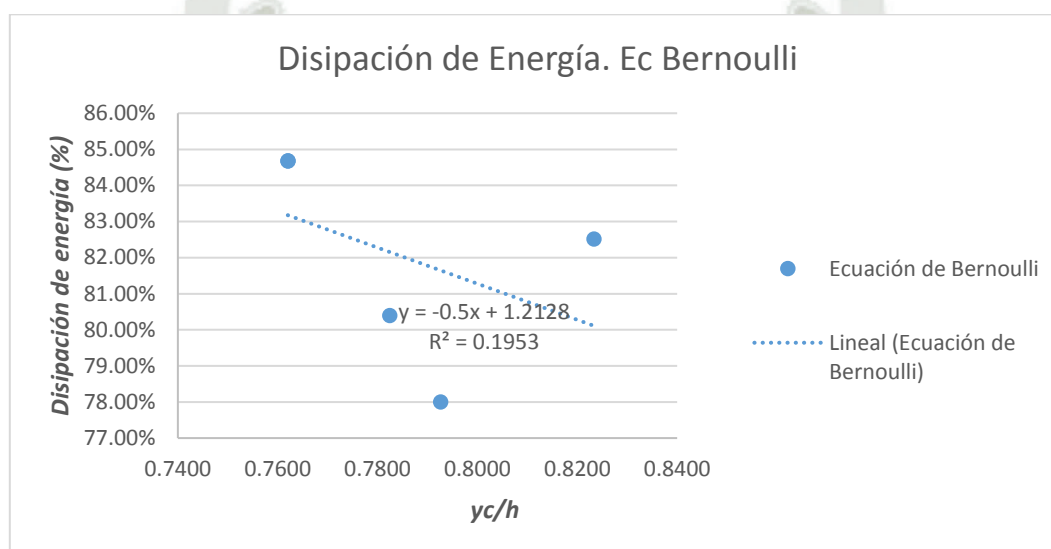


Figura. 58.-Relación del porcentaje de disipación de energía medido con el parámetro yc/h , para el flujo en transición (datos completos) ^{PA}

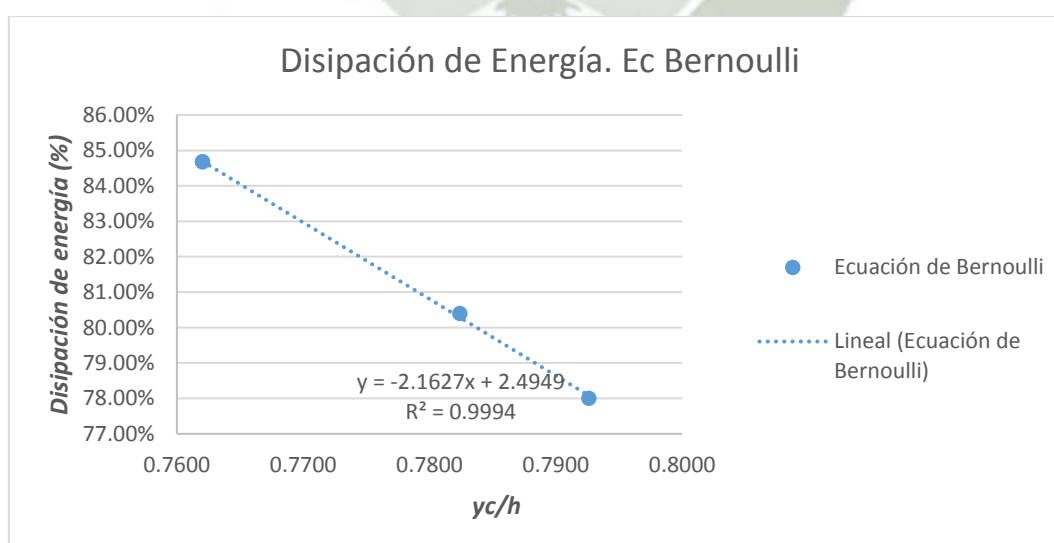


Figura. 59.-Relación del porcentaje de disipación de energía medido con el parámetro yc/h , para el flujo en transición (se omite el resultado para $yc/h=0.82$) ^{PA}

5.2.2.2. Análisis de resultados para régimen de flujo rasante

5.2.2.2.1. Perfil de flujo rasante

En base a la observación realizada en laboratorio consideramos que el flujo rasante comienza para caudales mayores iguales a 12.31 l/s en modelo, para este caudal precisamente es que se observaron que las cavidades de aire presentes en el interior de los escalones y la lámina de agua había desaparecido totalmente, así mismo las salpicaduras disminuyeron paulatinamente conforme se incrementaba el caudal que circulaba en la estructura.

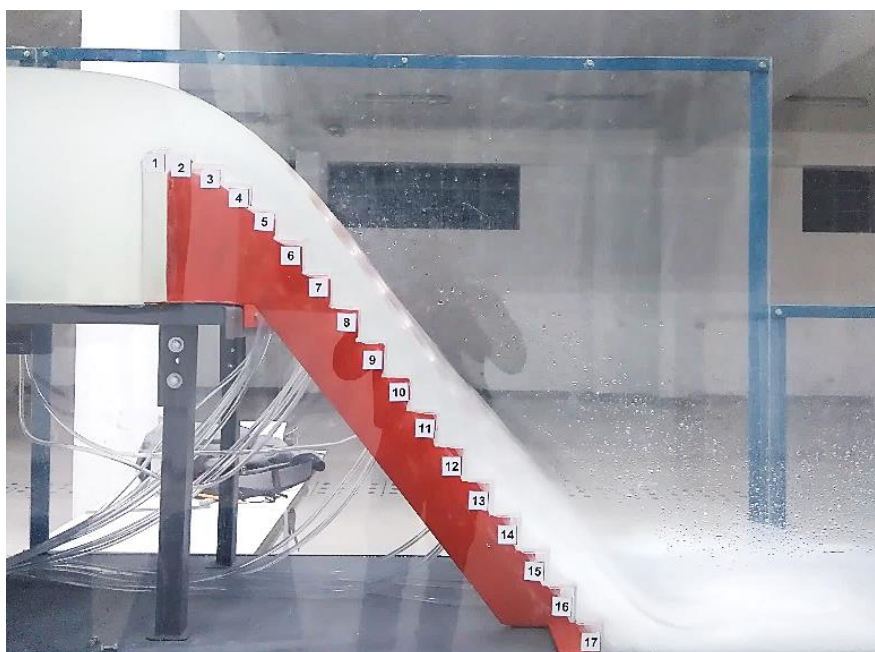


Figura. 60.-Perfil de flujo uniforme, presente para el flujo rasante. ^{PA}

5.2.2.2.2. Entrada de aire para flujo rasante

Para el rango de caudales que va desde 12.31 l/s hasta los 16.25 l/s ($yc/h=0.84$ a $yc/h=1.01$) se observa que la zona no aireada se extiende hasta el octavo escalón, una distancia aproximada en el eje "x" de la cresta entre 0.32 m y 0.36 m., esta parte corresponde a la zona de flujo rápidamente variado, la capa límite va extendiéndose desde la cresta hacia el exterior con el flujo en este tramo, seguidamente se observa la aireación de la rápida, con un cambio en el perfil, aparecen los flujos de recirculación y aparecen también salpicaduras bastante pronunciadas, esta parte corresponde al flujo rápidamente variado y se extiende hasta el onceavo escalón, una distancia aproximada de 0.44 m desde la cresta del aliviadero, luego se produce un flujo gradualmente variado en los siguientes cuatro escalones, una distancia de 0.6m desde la cresta del aliviadero y finalmente el flujo uniforme hasta el final de la rápida, donde el flujo tiende a estabilizarse, ya que, las salpicaduras desaparecen y se distingue la superficie virtual entre el flujo de recirculación y el flujo superior.

Para el rango de caudales que va desde 16.37 l/s hasta los 27.93 l/s ($yc/h=1.01$ a $yc/h=1.45$) se observa que la zona no aireada se extiende hasta el onceavo escalón, una distancia aproximada en el eje "x" de la cresta de 0.44 m., esta parte corresponde a la zona de flujo rápidamente variado, la capa límite va extendiéndose desde la cresta hacia el exterior con el flujo en este tramo, seguidamente se observa la aireación de la rápida, con un cambio en el perfil, aparecen los flujos de recirculación y aparecen también salpicaduras bastante pronunciadas, esta parte corresponde al flujo rápidamente variado y se extiende hasta el quinceavo escalón, una distancia aproximada de 0.60 m desde la cresta del aliviadero, luego se produce un flujo gradualmente variado hasta el pie del aliviadero, con el número de escalones no llega a desarrollarse flujo uniforme.

Para el rango de caudales que va desde 30.20 l/s hasta los 38.70 l/s ($yc/h=1.53$ a $yc/h=1.80$) se observa que la zona no aireada se extiende hasta el doceavo escalón, una distancia aproximada en el eje "x" de la cresta de 0.48 m., esta parte corresponde a la zona no aireada, la capa límite va extendiéndose desde la cresta hacia el exterior con el flujo en este tramo, seguidamente se observa la aireación de la rápida, con un cambio en el perfil, aparecen los flujos de recirculación y aparecen también salpicaduras bastante pronunciadas, esta parte corresponde al flujo rápidamente variado y se extiende hasta el pie del aliviadero.

Para el rango de caudales que va desde 38.97 l/s hasta los 44.41 l/s ($yc/h=1.81$ a $yc/h=1.97$) se observa que la zona no aireada se extiende hasta el quinceavo escalón, una distancia aproximada en el eje "x" de la cresta de 0.5 m., esta parte corresponde a la zona de flujo no aireada, nuevamente no se observa el flujo rápidamente variado ni gradualmente variado, por lo tanto, no se llega a formar el flujo uniforme.

Para el rango de caudales finales que va desde 45.16 l/s hasta los 54.26 l/s ($yc/h=2.00$ a $yc/h=2.26$) no se observa aireación del flujo, esto se debe a que el tirante de flujo encima del aliviadero es considerable, sin embargo, se observa ondulaciones (crestas) superficiales del flujo que van desde la mitad del aliviadero hasta el final.

En la figura 61, que corresponde al caudal $Q=45.15$ l/s se observa que la zona no aireada se extiende hasta casi la base del aliviadero, no se observa el punto de ingreso de aire, lo que significa que la capa límite no tiene la fuerza ascensional suficiente para salir a la superficie. A partir del décimo escalón a una distancia aproximada de 0.40 m desde la cresta del aliviadero vemos que se producen ondulaciones encima del flujo, esto debido a, el constante intercambio que se da en la superficie virtual producida por las aristas de los escalones. La capa límite se acerca a la superficie a partir del décimo escalón, sin embargo, como ya se ha mencionado no tiene la fuerza ascensional suficiente para salir a la superficie libre, este es otro de los factores por el cual se producen las ondulaciones superficiales, es en el escalón quince (N° 15) que el tirante disminuye y se observa un ligero salto de agua, un salpicón que indica que en ese punto la capa límite ha alcanzado la superficie libre, sin embargo la aireación propiamente dicha no se produce, las mismas ondulaciones que hacen que el tirante en el escalón quince varíen hacen que la capa límite salga a superficie por breves momentos.

Conforme se incrementa el caudal sobre el aliviadero, el punto de inicio de ondulaciones va avanzando aguas abajo y paulatinamente dejan de producirse los salpicones de agua, indicando que no se produce aireación.

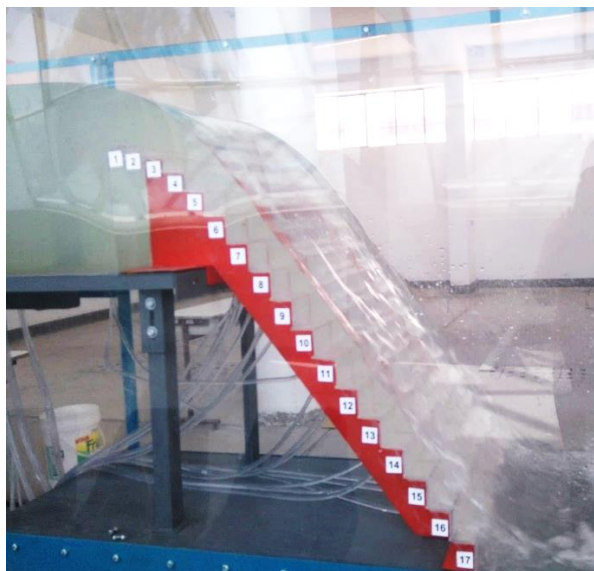


Figura. 61.-Perfil de flujo rasante, sin aireación, para $Q=45.15 \text{ l/s}$ (modelo)^{PA}

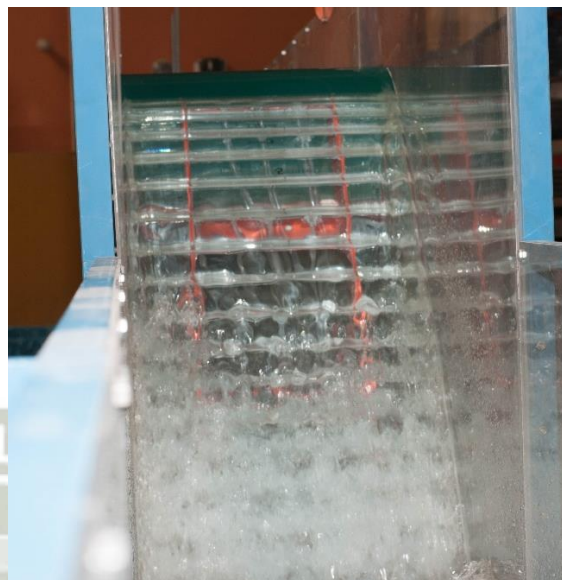


Figura. 62.-Entrada de aire en el flujo rasante
[Fotografía: Rodríguez C.]

5.2.2.2.3. Disipación de Energía – Flujo Rasante

Los datos recogidos de las campañas experimentales permiten encontrar el porcentaje de disipación de energía y en base a la observación se han considerado distintas de estimación de energía disipada para determinados rangos de caudal. Para los primeros caudales que van desde $Q = 12.31 \text{ l/s}$ hasta $Q = 17.78 \text{ l/s}$ con $y_c/h = 0.84$ hasta $y_c/h = 1.07$ respectivamente, el cálculo de disipación de energía se hizo con el trinomio de Bernoulli y con la ecuación propuesta por Chanson (1994a) (para flujo rasante), esta última utiliza un coeficiente de fricción equivalente (f), que se calcula con el promedio de velocidades del flujo a lo largo del calado y tirante y_p (tirante donde se alcanza el flujo uniforme), lo cual se hizo para este rango de caudales, de acuerdo con la observación para este rango de caudales se llega a producir el flujo uniforme en los últimos escalones del aliviadero.

Teniendo en cuenta la observación de comportamiento hidráulico del aliviadero escalonado para caudales desde $Q = 12.31 \text{ l/s}$ hasta $Q = 17.78 \text{ l/s}$, para calcular la velocidad promedio de la rápida se consideraron las velocidades medidas a partir del tercer escalón, así mismo el tirante del flujo uniforme se consideró el del doceavo escalón ($x = 0.531 \text{ m.}$).

Para los caudales que van desde $Q = 19.64 \text{ l/s}$ hasta $Q = 54.26 \text{ l/s}$ con $y_c/h = 1.146$ hasta $y_c/h = 2.26$ respectivamente, también se calculó la disipación de energía por medio de la ecuación de Bernoulli y la ecuación propuesta por Chanson para flujo rasante, sin embargo, para este rango de caudales no se llegó a producir el flujo

uniforme necesario para la aplicación de la metodología de Chanson, por lo cual, se consideró que el flujo uniforme se produce aguas abajo del pie del aliviadero, a una distancia lo suficientemente larga ($x = 1.873 \text{ m.}$) como para que las perturbaciones producidas por el cambio de dirección del flujo no afecten las mediciones, siendo el problema principal la presencia de aire en el flujo.

A la distancia $x = 1.873 \text{ m.}$ que corresponde al punto denominado y_5 , se observó que el flujo se estabiliza después del salto que se produce a pie de aliviadero.



CAPÍTULO VI

6. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

6.1.1. Análisis dimensional

Para que un modelo físico sea rigurosamente representativo de la realidad se debe asegurar de cumplir con la semejanza entre el modelo y el prototipo. Esto se refleja en la semejanza geométrica, semejanza dinámica y semejanza cinemática. Para lo cual, se requiere que los números de Reynolds, Froude, Weber y Mach, sean los mismos en el modelo y en el prototipo.

Esta semejanza solo se logra si el modelo es del mismo tamaño que el prototipo, por lo que, considerando que las fuerzas inerciales están presentes en todos los fluidos es posible comparar con ellas las demás fuerzas actuantes en un fenómeno hidráulico y definir su relevancia.

Números	Relación	Relevancia
Froude	Fuerzas inerciales/Fuerzas gravitacionales	En lámina libre
Reynolds	Fuerzas inerciales/Fuerzas viscosas	Todos los problemas de fluidos
Weber	Fuerzas inerciales/Fuerzas de tensión superficial	En efectos de tensión superficial
Mach	Fuerzas inerciales/Fuerzas elásticas	En efectos de compresibilidad
Coef. de presión	Fuerzas de presión/Fuerzas inerciales	En gradientes de presión

Tabla. 25.- Conjunto de parámetros adimensionales
Fuente: Estrella 2005

Para el análisis en modelo reducido de aliviaderos escalonados se utiliza la semejanza de Froude, lo que supone que las fuerzas de inercia y peso serán las mismas en el modelo y prototipo.

6.1.2. Efectos de escala

El análisis de la disipación de energía sobre el aliviadero escalonado se realiza de modo experimental en una estructura de dimensiones relativamente reducidas. Para llevar los datos del modelo experimental hacia un prototipo es necesario cumplir con las semejanzas mencionadas en el capítulo 3, como la presión, peso, viscosidad y tensión superficial.

En el tipo de flujo presente, flujo rasante, las variables que intervienen son: las variables que definen la geometría del canal y los escalones, características cinemáticas como velocidad y caudal unitario; la aceleración de la gravedad; propiedades físicas del fluido, como la densidad, viscosidad dinámica y tensión superficial.

La semejanza geométrica indica una relación de proporcionalidad denominada escala ($e = \xi_p/\xi_m$), entre las características geométricas medidas en modelo (ξ_m) y

prototipo (ξ_p). Existe semejanza dinámica entre modelo y prototipo si el fluido está sometido en puntos homólogos a fuerzas proporcionales de razón constante. Si existe semejanza geométrica y dinámica se habla de semejanza mecánica lo que implica (Citado en Amador,2005):

$$e_{Fr} = e_{We} = e_{Re} = e_{Ca} = 1$$

Como se ha visto anteriormente, esto es imposible fijar semejanza mecánica por la incompatibilidad de fuerzas que actúan en el sistema.

Por tanto, usualmente se opta por la ley de semejanza de Froude ($e_{Fr} = 1$), siendo relevantes las fuerzas gravitatorias, de inercia y presión.

Según Mateos y Elviro (1999) escalas entre 6 y 25, referidos a alturas de escalón entre 0.9 y 1.2m de altura y taludes 0.75h:1v y 0.8h: 1v. Determinan que el punto de comienzo de aireación (siendo este un parámetro difícil de medir, por ende, de mayor precisión), puede variar con respecto al prototipo en un orden del 5% para modelos con escala menores que 20, debiendo la lámina vertiente ser igual o superior a la mitad de escalón.

Diversos autores recomiendan valores mínimos de Reynolds $=10^5$ y del número de We=100 para modelar flujo aire-agua en aliviaderos escalonados.

Bidimensionalidad del flujo.

Para realizar la medición de la presión a lo largo de los escalones se considera que el flujo es bidimensional, o sea que las presiones son idénticas sobre cualquier punto de medida a lo ancho de un peldaño, solamente se tuvo la consideración de no colocar los piezómetros en el rango de influencia de los cajeros laterales.

El diámetro interno del tubo para los piezómetros tiene 6 mm, y este permanece inalterado a lo largo de todos los pasos de los escalones.

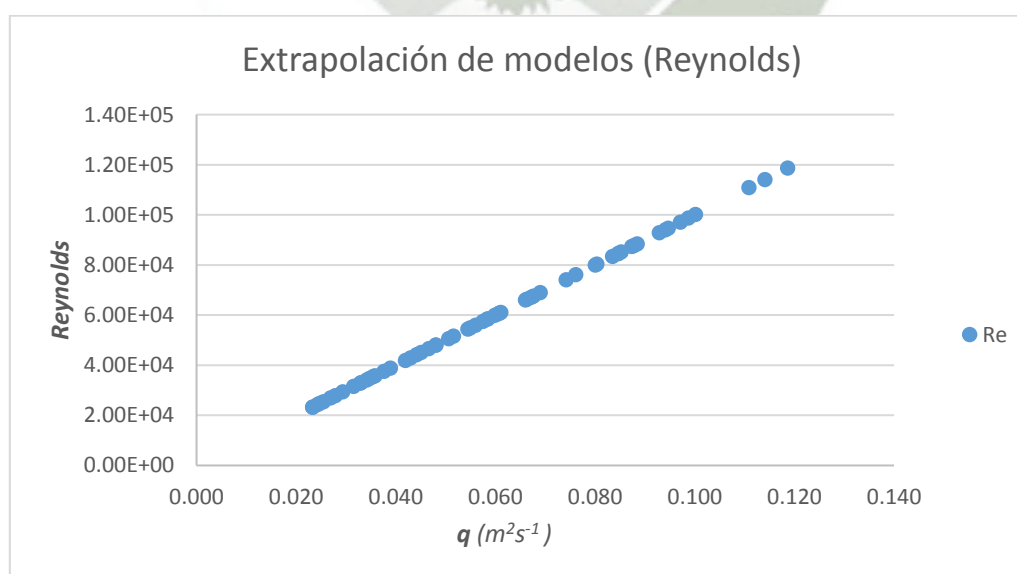


Figura. 63.-Número de Reynolds para los caudales ensayados en laboratorio ^{PA}

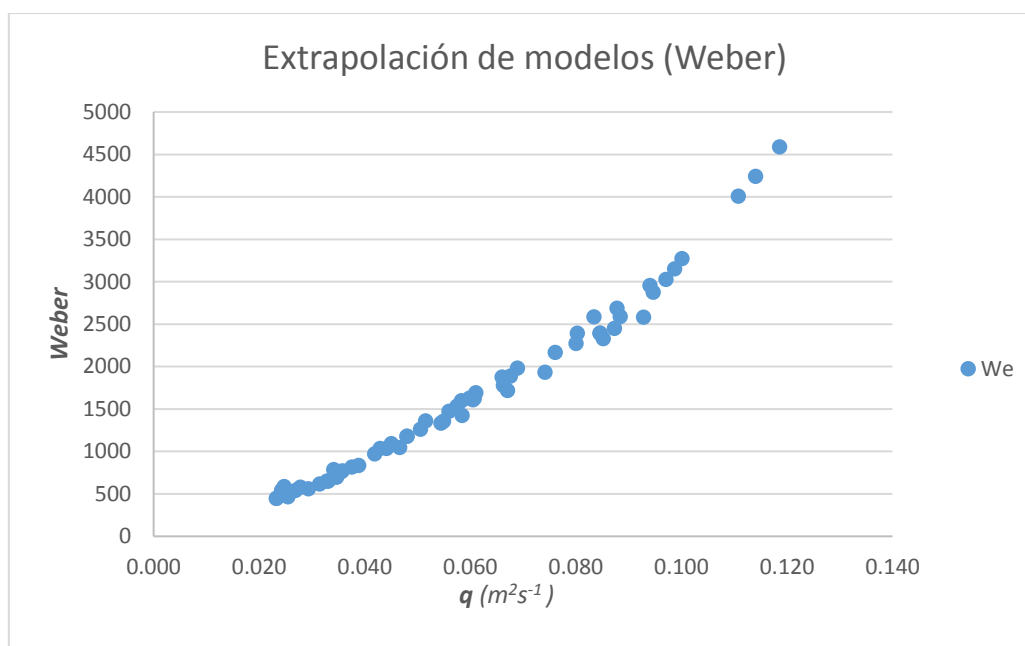


Figura. 64.-Número de Weber para los caudales ensayados en laboratorio ^{PA}

6.1.3.Umbral de cambio a flujo rasante

Como se mencionó en el capítulo anterior, para determinar el umbral de cambio se consideró la completa inmersión de los escalones.

En la campaña experimental se observó que el límite de inicio de flujo rasante se sitúa alrededor de $y_c/h \approx 0.84$.

Caudales de cambio de régimen obtenidos por los diversos autores, según Chanson (1994a)		
h/l	y_c/h	Autor
0.2	1.2	Essery Horner (1978)
0.421	0.81	
0.526	0.82	
0.736	0.83	
0.842	0.81	
0.831	0.74	
0.5	0.67	Peyras et al. (1992)
1	0.62	Degoutte et al. (1992)
1.25	0.4	Beitz et al (1992)

Tabla. 26.-Caudales de cambio de régimen obtenidos por los diversos autores, según Chanson (1994a)

Caudales de cambio de régimen obtenidos por los diversos autores, considerados para obtener el umbral de cambio		
yc/h	h/l	Autor
1.2	0.2	Essery Horner (1978)
0.815	0.421	
0.816	0.526	
0.831	0.736	
0.813	0.842	
0.8	0.4	Rajaratnam (1990)
0.8	0.9	
0.839	1.25	Autor*

Tabla. 27.-Caudales de cambio de régimen obtenidos por los diversos autores, considerados para obtener el umbral de cambio, Autor*: valor obtenido de la presente investigación ^{PA}

Es importante resaltar que, los datos de Degoutte et al. (1992) se realizaron para escalonados es gaviones, es obvio pensar que el comportamiento difiere debido a la infiltración. Así mismo Sánchez Juny (2001) explica en base al estudio de Peyras et al. (1992) que es difícil que hayan desarrollado flujo uniforme.

En base a los datos de Essery Horner (1978) y el valor observado y_c/h observado en laboratorio, se realiza un ajuste por mínimos cuadrados para obtener una aproximación del umbral de cambio a flujo rasante.

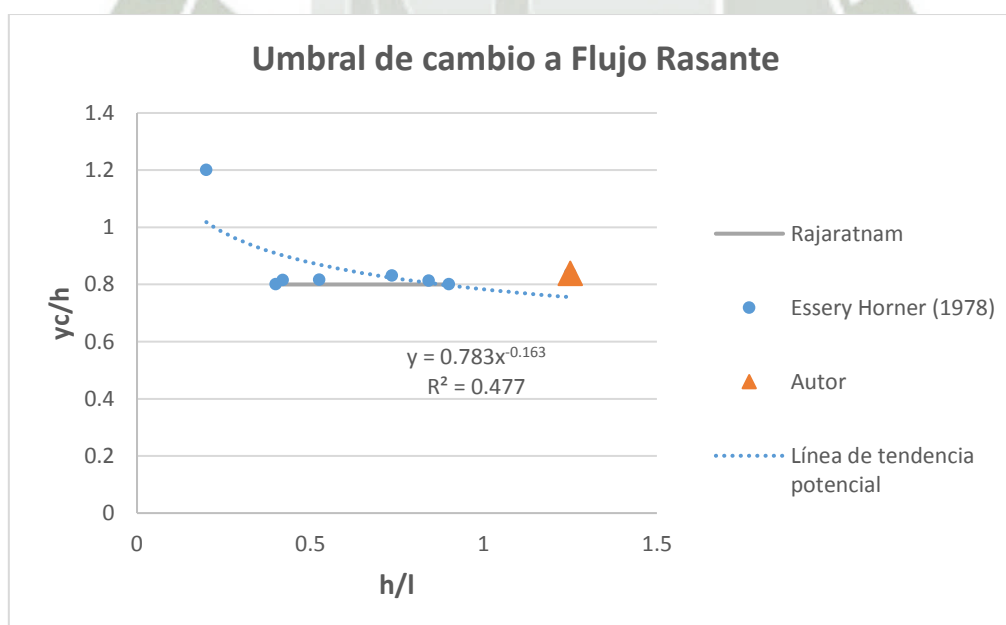


Figura. 65.-Umbral de cambio a Flujo Rasante, Datos de Essery Horner (1978), Rajaratnam(1990) y Autor(2017). Datos presentados en la tabla 26^{PA}

Ecuaciones procedentes del ajuste por mínimos cuadrados de los datos de Essery Horner (1978), Rajaratnam (1990) y los datos obtenidos de la investigación:

Ecuación	R	Tipo
$y_c/h = 0.9977 - 0.2024(h/l)$	0.501	Lineal
$y_c/h = 0.7741 - 0.164\ln(h/l)$	0.699	Logarítmica
$y_c/h = 0.9769e^{-0.199(h/l)}$	0.491	Exponencial
$y_c/h = 0.7767(h/l)^2 - 1.3202(h/l) + 1.3195$	0.810	Polinómica
$y_c/h = 0.783(h/l)^{-0.163}$	0.691	Potencial

Tabla. 28.- Ecuaciones propuestas mediante un ajuste por mínimos cuadrados (Figura 59)^{PA}

La ecuación que mejor correlación tiene es la polinómica seguida de la ecuación logarítmica, sin embargo, esta última no diere demasiado de la potencia y la ecuación logarítmica es más compleja; por lo tanto, se adopta la ecuación potencial, al ser una aproximación.

Ecuación para determinar el umbral de cambio a flujo rasante

$$\frac{y_c}{h} = 0.783 \left(\frac{h}{l} \right)^{-0.163}$$

Válido para $0.1 < h/l < 1.25$ y peldaños de huella horizontales.

En anexos se muestran las figuras con diferentes tipos de ecuaciones.

6.1.4.Relaciones de disipación de energía para variables adimensionales

6.1.4.1.Relaciones entre variables geométricas

- Variable $\frac{b}{h}$:

Representa la relación entre la base del canal y la altura de los escalones, la mayoría de autores consultados no toman este parámetro en consideración, salvo en modelos donde se tiene consenso de que la perturbación de los cajeros laterales influye en el comportamiento del canal en un rango de 8 a 10 cm. (se puede apreciar en el efecto de la aireación, en las zonas cercanas a los cajeros la aireación comienza más cerca de la coronación) hacia el centro, por lo que para efectos de la experimentación se consideró tomar la medidas en el centro del aliviadero.

- Variable $\frac{H_{dam}}{h}$:

Este parámetro es importante en la modelación, sin embargo, no lo tomamos en cuenta ya que no se cuenta con puntos de comparación, al disponer de una sola altura de aliviadero.

- Variable $\frac{l}{h}$:

Parámetro importante, se toma en cuenta para complementar otros parámetros.

- Variable α :

Parámetro fundamental, presente en la mayoría de parámetros adimensionales.

6.1.4.2. Relación del tirante crítico y la altura de escalón

Parámetro fundamental, relaciona las el caudal, la gravedad y la altura típica de los escalones del aliviadero.

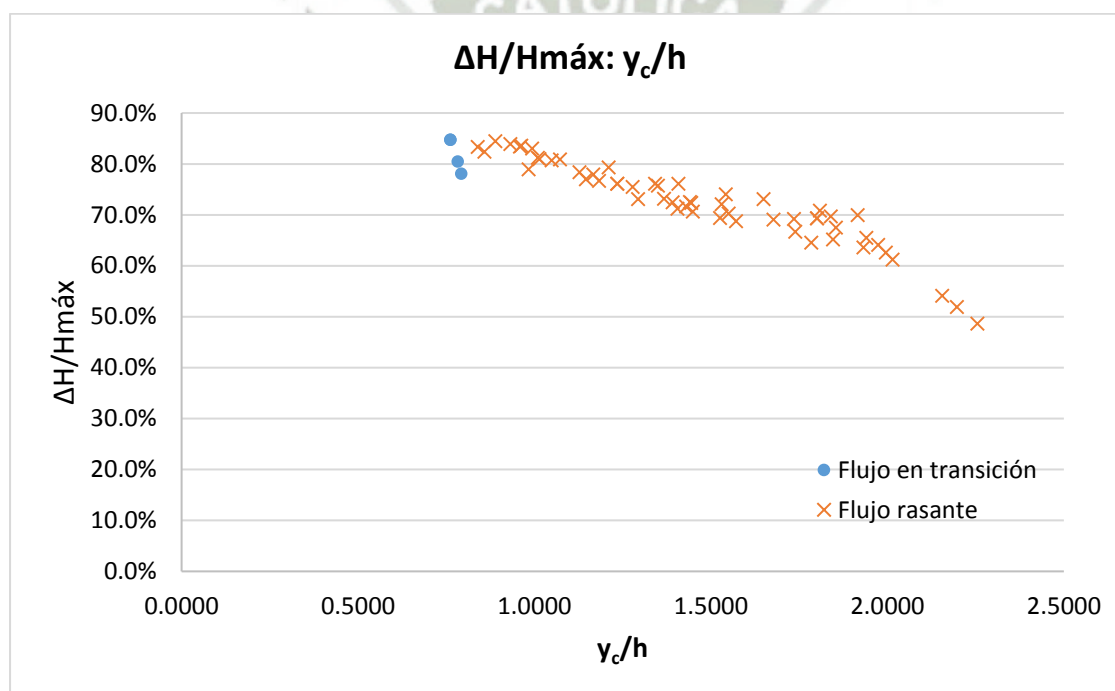


Figura. 66.-Relación de la disipación de energía con el parámetro yc/h ^{PA}

Se observa la clara tendencia de disminución en la disipación de energía conforme aumenta el caudal circulante sobre el aliviadero.

El comportamiento en el flujo en transición es difícil caracterizar y dado el poco margen de caudales que se pueden ensayar en el régimen, se hace un escueto análisis; se observa que la disipación de energía está alrededor del 80 % y que tiende a disminuir con un ligero aumento del caudal.

El régimen de flujo rasante, se distinguen tres zonas definidas en el gráfico:

Para valores de $0.86 < \frac{y_c}{h} < 1.65$, se conserva la pendiente de disminución de energía pasando en promedio de 77% a 72 % de disipación de energía.

Para valores $1.65 < \frac{y_c}{h} < 1.92$ se observa una disminución de alrededor de 4% en la disipación de energía pasando en promedio de 72 a 67 % de disipación de energía.

Para valores de $1.93 < \frac{y_c}{h} < 2.26$ se observa que la disipación de energía disminuye en cantidades mayores conforme aumenta el caudal en comparación de los rangos antes mencionados, variando en promedio de 66% a 48% (considerando que es una variación reducida de $\frac{y_c}{h}$).

6.1.4.3. Número de Reynolds

Se muestra la relación del número adimensional de Reynolds con respecto a disipación de energía, se visualiza claramente que para valores de Reynolds bajos la disipación de energía es mayor.

Directamente relacionado con la velocidad del flujo, directamente proporcional a este parámetro.

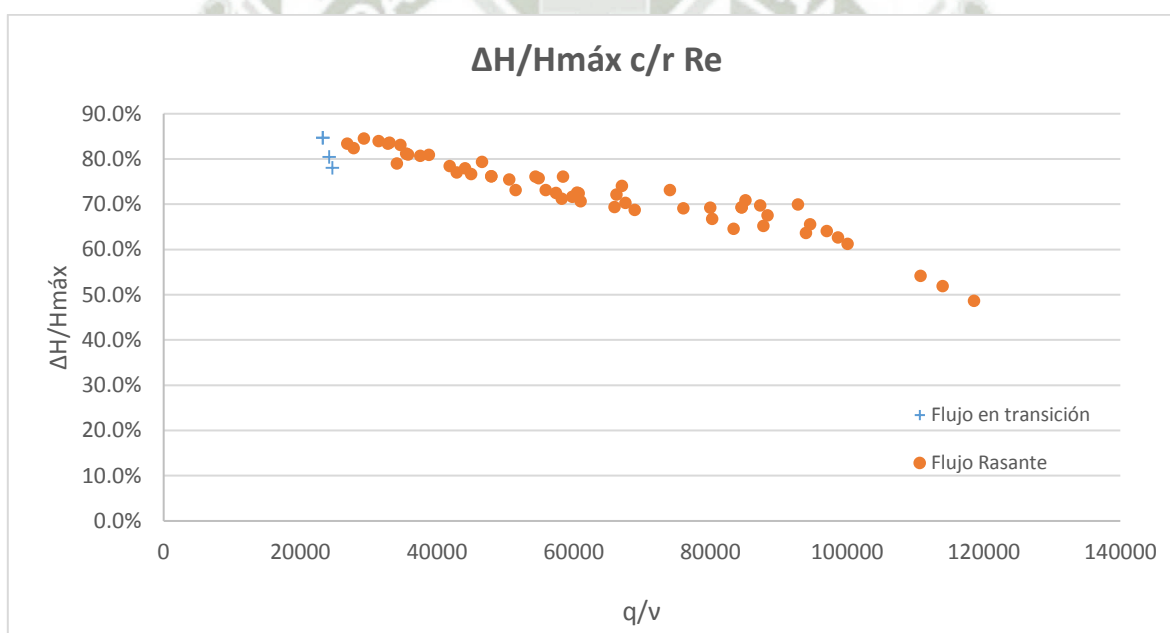


Figura. 67.-Relación de la disipación de energía con el número de Reynolds $(q/v)^{PA}$

Para valores de Reynolds mayores a 97000 la disipación de energía tiende a disminuir de forma proporcional.

Se observa una diferencia entre los valores para el régimen en transición y el rasante, esto se debe a que el número de Reynolds está directamente relacionado con el caudal de agua circulante por el modelo.

6.1.4.4. Número de Froude

Parámetro adimensional fundamental para la modelación de estructuras hidráulicas.

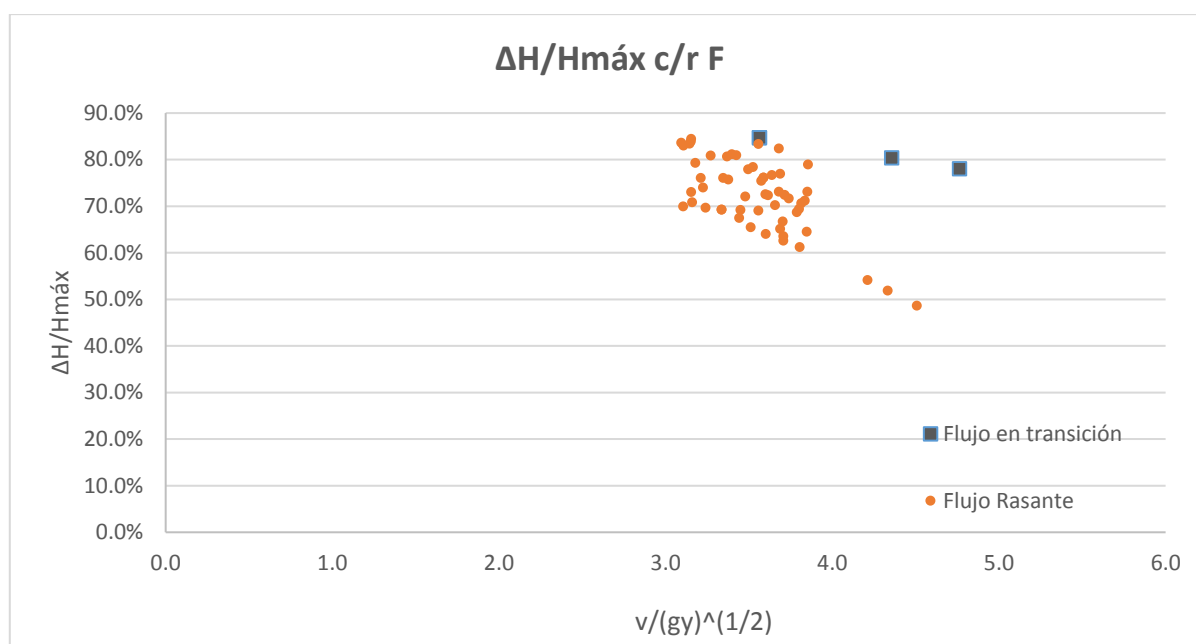


Figura. 68.-Relación de la disipación de energía con el número de Froude $(v/(gy)^{(1/2)})^{PA}$

Luego del análisis, vemos que el número de Froude por sí mismo no nos brinda demasiada información, teniendo en cuenta que este es un parámetro fundamental para el modelamiento y que la similitud está basada en este parámetro, creemos necesario incluir este parámetro con otra variable para encontrar una mejor relación entre las variables.

6.1.4.5. Número de Euler

Este parámetro es importante analizar cuando existe una pérdida considerable de presión, sin embargo, después de haber realizado las campañas experimentales y realizado el análisis, consideramos que los cambios de presión no son lo suficientemente grandes como para ocasionar peligro de cavitación.

6.1.5. Parámetro propuesto

Como se mencionó cuando se hizo el análisis del número de Froude, este último no permite realizar un análisis detallado con respecto a la disipación de energía, sin embargo, al combinarlo con el parámetro que relaciona el tirante crítico con la altura de escalón, obtenemos una correlación que permite caracterizar la disipación de energía con facilidad.

La disipación de energía se obtuvo por medio del trinomio de Bernoulli por lo que, las variables involucradas son: velocidad característica, gravedad, tirantes (altura de agua), nivel (energía potencial). El parámetro propuesto involucra la velocidad, gravedad, tirantes de agua, adicionalmente incluye la altura de escalón, variable fundamental para el estudio.

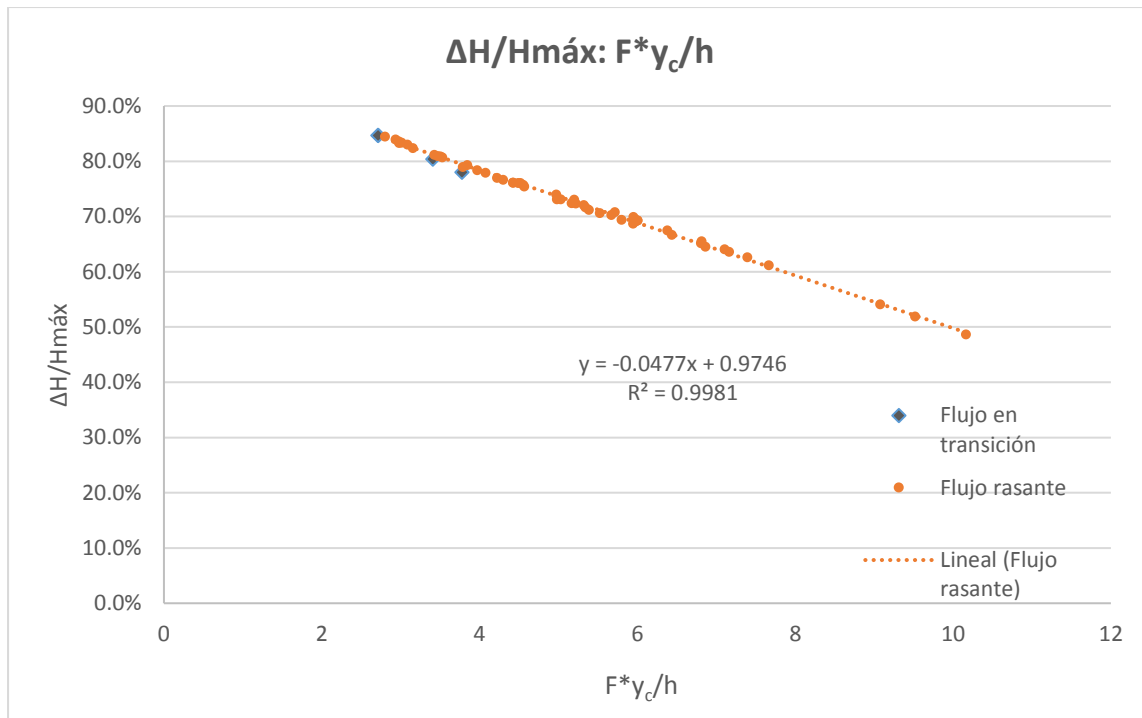


Figura. 69.-Relación de la disipación de energía con el parámetro propuesto ($F \cdot y_c/h$) ^{PA}

La ecuación calculada mediante un ajuste por mínimos cuadrados posee una correlación bastante elevada, acercándose a la unidad.

$$\frac{\Delta H}{H_{máx}} = 0.9746 - 0.0477 \cdot F \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)$$

Válido para $0.84 < y_c/h < 2.25$

Donde:

ΔH : Variación de la energía

$H_{máx}$: Máxima carga disponible

F : Número de Froude

y_c : Tirante Crítico

h : Altura de escalón

6.1.6.Comparación de resultados para régimen de flujo rasante

6.1.6.1. Comparación del porcentaje medido y el porcentaje calculado a partir de la ecuación propuesta por Chanson (1994)

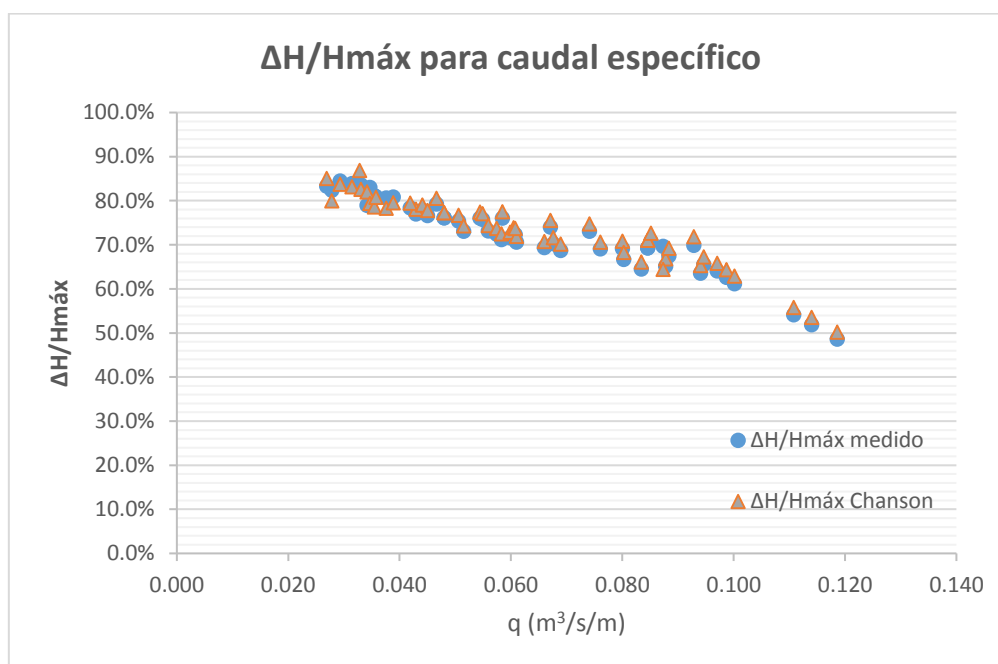


Figura. 70.-Comparación del porcentaje medido y el porcentaje calculado a partir de la ecuación propuesta por Chanson (1994)^{PA}

Se muestran el gráfico para algunos datos, a fin de visualizar mejor el comportamiento.

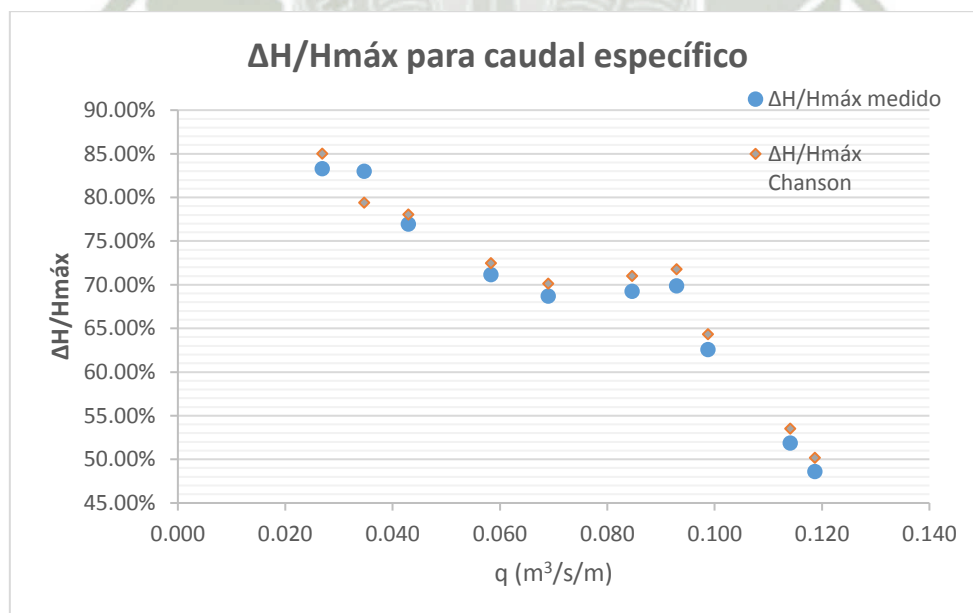


Figura. 71.-Comparación de valores representativos del porcentaje medido y el porcentaje calculado a partir de la ecuación propuesta por Chanson (1994) para el caudal específico (q ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$))^{PA}

Del análisis de los resultados, se ve que para caudales bajos (modelo), el porcentaje de disipación de energía medido es diferente con al calculado con la ec. de Chanson, para ciertos puntos es mayor y viceversa.

Para caudales específicos $0.027 < q < 0.034$ la disipación de energía se comporta de manera irregular, se observa que los valores medidos sobrepasan y se ven reducidos frente a los calculados con la ec. de Chanson,

Para caudales específicos $0.035 < q < 0.039$ la disipación de energía medida es mayor a la calculada por medio de la ec. de Chanson.

Para caudales específicos $0.043 < q < 0.119$ la disipación de energía medida es menor a la calculada por medio de la ec. de Chanson, las mediciones van aumentando la diferencia con respecto al cálculo (ec. Chanson) a medida que aumenta el caudal.

6.1.6.2. Comparación del porcentaje de disipación de energía medido con el porcentaje calculado a partir de la ecuación propuesta

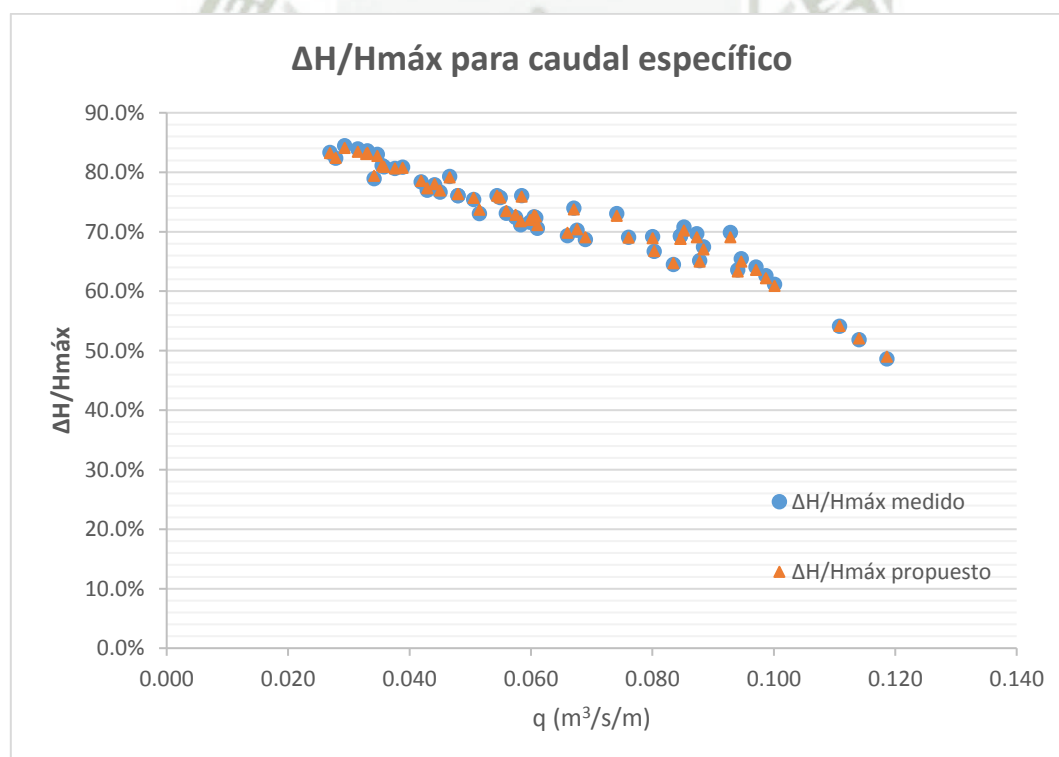


Figura. 72.-Comparación del porcentaje de disipación de energía medido con el porcentaje calculado a partir de la ecuación propuesta (datos completos q ($m^3/s/m$))^{PA}

Los valores casi se superponen, para todo el rango de caudales ensayados se tiene una diferencia máxima de 0.80% con respecto a la energía medida en

laboratorio. Predomina la tendencia a obtener valores menores a los medidos, esto debido a la diferencia marcada que se obtiene en las mediciones para los caudales máximos trabajados en laboratorio.

6.1.7. Disipación de energía medida en laboratorio para diferentes caudales

Se muestra el gráfico resultante para la disipación de energía en función a los caudales específicos, se hace una verificación de las fórmulas que resultan de la aplicación del método de mínimos cuadrados.

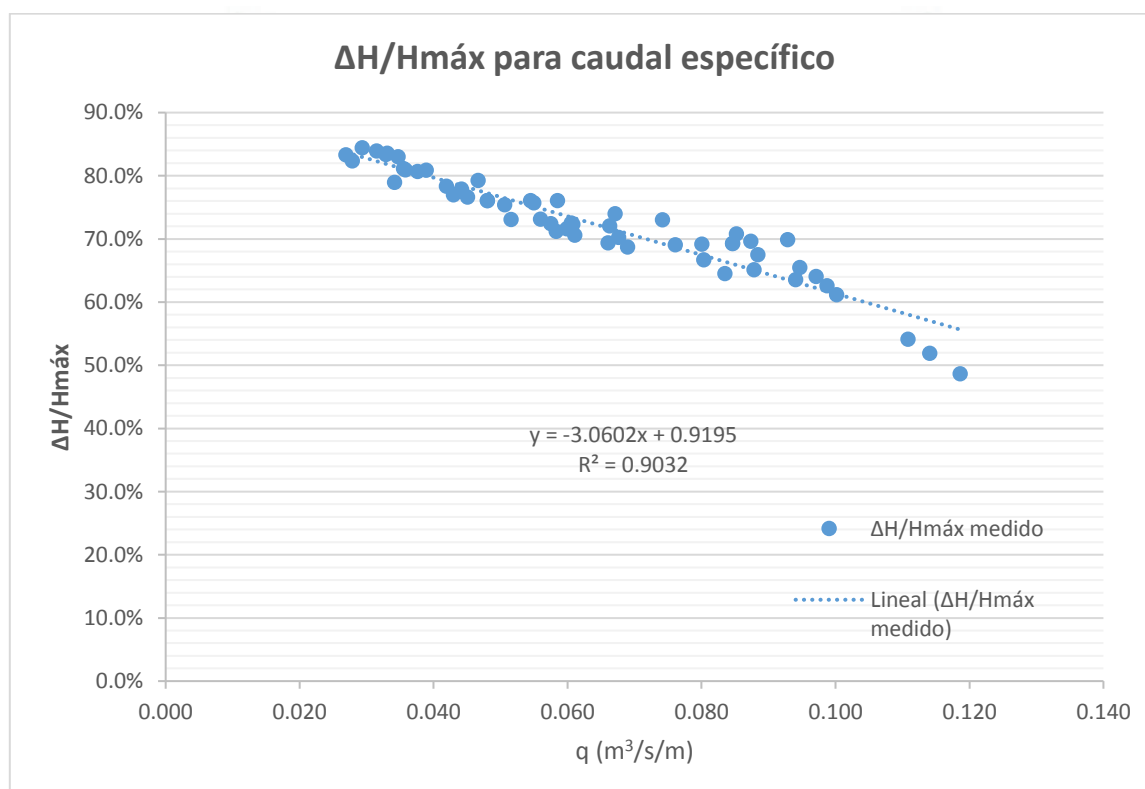


Figura. 73.-Disipación de energía en función a los caudales específicos, se hace una verificación de las fórmulas que resultan de la aplicación del método de mínimos cuadrados ^{PA}

De las ecuaciones propuestas en función al caudal específico se determina que más se ajusta al cálculo es la ecuación lineal, si bien es cierto, la ecuación polinomial tiene una correlación más elevada, la ecuación lineal destaca por su simplicidad y la diferencia de correlación es reducida con respecto a la ecuación polinómica. (Tabla N° 29)

$$\frac{\Delta H}{H_{máx}} = 0.9195 - 3.0602(q)$$

ECUACIONES: $\Delta H/H_{MÁX}$ PARA CAUDAL ESPECÍFICO

Ecuación	R ²	R	Tipo
$\frac{\Delta H}{H_{m\acute{a}x}} = 0.9195 - 3.0602(q)$	0.9032	0.9504	Lineal
$\frac{\Delta H}{H_{m\acute{a}x}} = 0.2117 - 0.181\ln(q)$	0.8575	0.9260	Logarítmica
$\frac{\Delta H}{H_{m\acute{a}x}} = 0.9545e^{-4.426(q)}$	0.8753	0.9356	Exponencial
$\frac{\Delta H}{H_{m\acute{a}x}} = -10.964(q)^2 - 1.5667(q) + 0.8753$	0.9101	0.9540	Polinómica
$\frac{\Delta H}{H_{m\acute{a}x}} = 0.3468 q^{-0.258}$	0.8059	0.8977	Potencial

Tabla. 29.- Ecuaciones de disipación de energía para caudal específico($q(m^3/s/m)$) ^{PA}



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

PRIMERO, del análisis de laboratorio, para el rango de caudales ensayados, se obtuvieron las principales características del flujo:

Se determinó que se presentan dos tipos de flujo, flujo en transición y flujo rasante.

Se presenta flujo en transición para caudales $Q < 12.31 \text{ l/s}$ (modelo), $Q < 6.14 \text{ m}^3/\text{s}$ (prototipo escala: 1/12), $Q < 16.91 \text{ m}^3/\text{s}$ (prototipo escala: 1/18), $Q < 34.72 \text{ m}^3/\text{s}$ (prototipo escala: 1/24).

Se presenta flujo en rasante para caudales $Q \geq 12.31 \text{ l/s}$ (modelo), $Q \geq 6.14 \text{ m}^3/\text{s}$ (prototipo escala: 1/12), $Q \geq 16.91 \text{ m}^3/\text{s}$ (prototipo escala: 1/18), $Q \geq 34.72 \text{ m}^3/\text{s}$ (prototipo escala: 1/24).

Se determinó que, la disipación de energía varía de manera inversamente proporcional al aumento del caudal para ciertos rangos de caudales

SEGUNDO, con respecto a la disipación de energía, para el rango de caudales ensayados en modelo, se tiene que:

Para valores de $12.31 < Q < 33.92$ (modelo l/s), se conserva la pendiente de disminución de energía pasando en promedio de 77% a 72 % de disipación de energía.

Para valores de $34.81 < Q < 42.48$ (modelo l/s), se observa una disminución de alrededor de 4% en la disipación de energía pasando en promedio de 72 a 67 % de disipación de energía.

Para valores de $43.03 < Q < 54.26$ (modelo l/s) se observa que la disipación de energía disminuye en cantidades mayores conforme aumenta el caudal en comparación de los rangos antes mencionados, variando en promedio de 66% a 48%.

CAUDAL			
Escala	12	18	24
MODELO [l/s]	PROTOTIPO [m^3/s]		
12.31	6.14	16.91	34.72
33.92	16.92	46.62	95.71
34.81	17.36	47.84	98.21
42.48	21.19	58.39	119.87
54.26	27.07	74.59	153.12

TERCERO, con respecto al punto de inicio de aireación en la rápida escalonada en el modelo.

Para el rango de caudales que va desde $Q = 12.31 \text{ l/s}$ hasta los $Q = 16.25 \text{ l/s}$ ($y_c/h = 0.84$ a $y_c/h = 1.01$) se observa que la zona no aireada se extiende hasta el octavo escalón, una distancia aproximada en el eje "x" de la cresta entre 0.32 m y 0.36 m.

Para el rango de caudales que va desde $Q = 16.37 \text{ l/s}$ hasta los $Q = 27.93 \text{ l/s}$ ($y_c/h = 1.01$ a $y_c/h = 1.45$) se observa que la zona no aireada se extiende hasta el onceavo escalón, una distancia aproximada en el eje "x" de la cresta de 0.44 m.

Para el rango de caudales que va desde $Q = 30.20 \text{ l/s}$ hasta los $Q = 38.70 \text{ l/s}$ ($y_c/h = 1.53$ a $y_c/h = 1.80$) se observa que la zona no aireada se extiende hasta el doceavo escalón, una distancia aproximada en el eje "x" de la cresta de 0.48 m.

Para el rango de caudales que va desde $Q = 38.97 \text{ l/s}$ hasta los $Q = 44.41 \text{ l/s}$ ($y_c/h = 1.81$ a $y_c/h = 1.97$) se observa que la zona no aireada se extiende hasta el quinceavo escalón, una distancia aproximada en el eje "x" de la cresta de 0.5 m.

Para el rango de caudales finales que va desde $Q = 45.16 \text{ l/s}$ hasta los $Q = 54.26 \text{ l/s}$ ($y_c/h = 2.00$ a $y_c/h = 2.26$) no se observa aireación del flujo.

CUARTO, la presión a lo largo del aliviadero varía con valores que van desde $\frac{P}{h} = -4.31$, hasta $\frac{P}{h} = 6.57$, los valores negativos se presentan en los primeros escalones para caudales bajos ensayados en el modelo.

La presión en la huella cuando no existe perturbación por la entrada de aire o flujo en transición, se comportan en respuesta al flujo de recirculación:

Para los puntos cercanos a la contrahuella de aguas arriba se registran las menores presiones, debido a que el flujo de recirculación gira en sentido horario, haciendo que en esta parte el flujo esté direccionado hacia la superficie del exterior de la rápida.

El punto ubicado a la mitad de la huella, la medida de presión es intermedia, debido a que el vórtice de recirculación se dirige en dirección paralela a la huella.

El punto ubicado en el extremo aguas abajo, registra las mayores presiones, debido a que el flujo de recirculación está dirigido hacia la parte interna de la cara de la huella.

QUINTO, el umbral de cambio de flujo en transición a rasante se determina con la fórmula.

$$\frac{y_c}{h} = 0.783 \left(\frac{h}{l} \right)^{-0.163}$$

Válido para $0.1 < h/l < 1.25$ y peldaños de huella horizontales.

Obtenida por un ajuste de mínimos cuadrados con datos obtenidos de la investigación y de Essery Horner (1972), Rajaratnam (1990) y la presente investigación.

SEXTO, la pérdida de energía para rápidas escalonadas, se puede determinar con la fórmula.

$$\frac{\Delta H}{H_{m\acute{a}x}} = 0.9746 - 0.0477 \cdot F \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)$$

Válido para $0.84 < y_c/h < 2.25$



RECOMENDACIONES

- La investigación, es de suma importancia para desarrollar criterios de cálculo y operación de estructuras, es necesario incentivar a los estudiantes de pregrado y postrado a realizar este tipo de trabajos.
- Para conseguir resultados de investigación que estén a la vanguardia, es necesario implementar los laboratorios con equipos tecnológicos que permitan tomar medidas con elevados márgenes de confiabilidad.
- Con respecto al trabajo en laboratorio, para trabajos futuros se recomienda:
 - Distinguir las variables a medir en la experimentación.
 - Elaborar un plan de pruebas, a fin de ajustar los tiempos.
 - Elaborar un plan de registro de medidas para asegurar la recopilación completa de datos.
 - Llevar un registro fotográfico de la experimentación.
 - Repetir los ensayos para tener un registro confiable y detectar posibles incompatibilidades.
- Con respecto a la experimentación de aliviaderos escalonados, para trabajos futuros se recomienda:
 - Utilizar caudales mayores a los ensayados en la presente investigación, a fin de observar el comportamiento de la presión cuando el flujo trata de separarse del perfil del aliviadero.
 - Utilizar caudales menores a fin de analizar el comportamiento del flujo tipo escalón a escalón, así como determinar el umbral de cambio aflujo en transición
 - Controlar que se forme flujo laminar aguas arriba del aliviadero, a fin de no generar velocidades significativas en la coronación, la presencia de disipadores de energía en el punto de llegada de agua procedente de las bombas de impulsión, es de absoluta necesidad.
 - Trabajar con anchos de canal lo suficientemente grandes para tener mayor área de trabajo, debido a que, las perturbaciones producidas por el contorno afectan hasta diez centímetros hacia el eje del canal.
 - Extender el estudio ajustando el aliviadero para medir las características y disipación de energía con diferente número de escalones, esto se puede lograr colocando la parte del canal aguas abajo del aliviadero a distintas alturas.

- Extender el estudio utilizando escalones con contrapendiente y umbrales al final de los escalones.
- Para complementar el estudio se puede analizar la disipación de energía a pie de aliviadero, con diferentes elementos, como dados, gradas, etc.
- Para el modelo hidrodinámico, controlar la caída de agua desde el canal hacia el depósito acumulador, a fin de, alargar el periodo de vida de las bombas, colocar un dissipador de energía antes del punto de succión de las bombas.
- Garantizar la impermeabilización de la estructura del modelo para no afectar el comportamiento debido a fugas localizadas de agua.

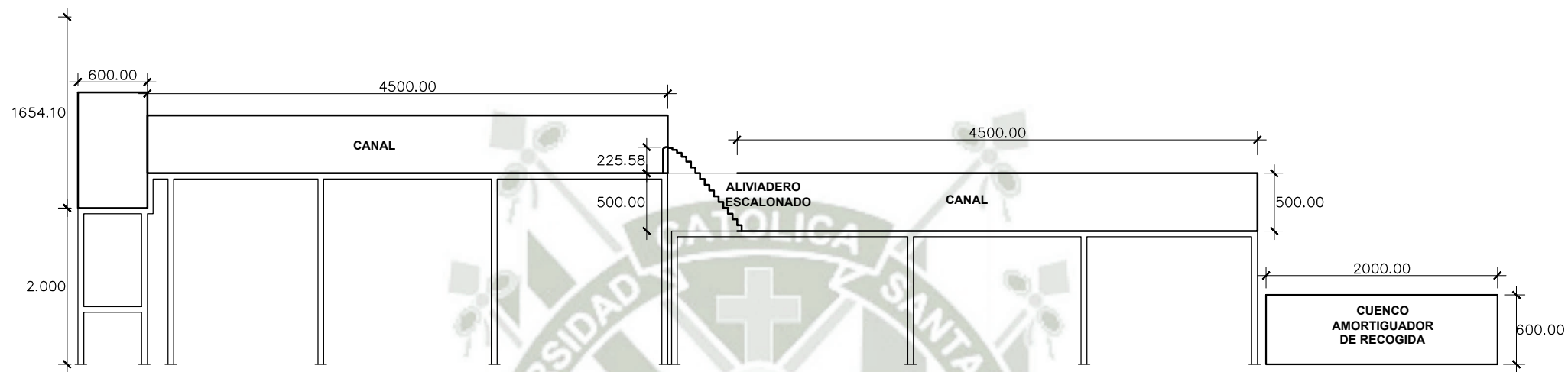


ANEXOS



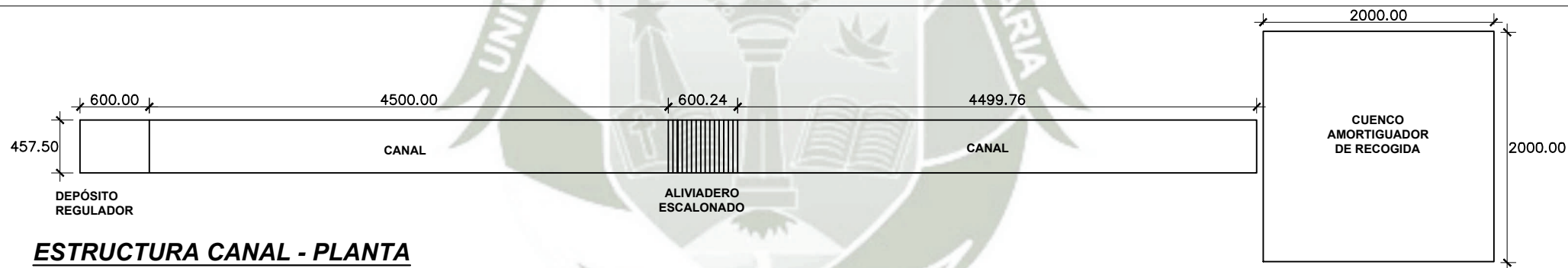


ANEXO A - PLANOS



ESTRUCTURA CANAL - PERFIL

Esc: 1/50



ESTRUCTURA CANAL - PLANTA

Esc: 1/50

AR
UCSM

PROYECTO

TESIS PREGRADO

Arnold Julian Llanos Chaiña

LÁMINA N° 01 DE 01

E 01

PLANO :

ESQUEMA DEL CANAL

UBICACIÓN :

DEPARTAMENTO:
PROVINCIA:
DISTRITO:

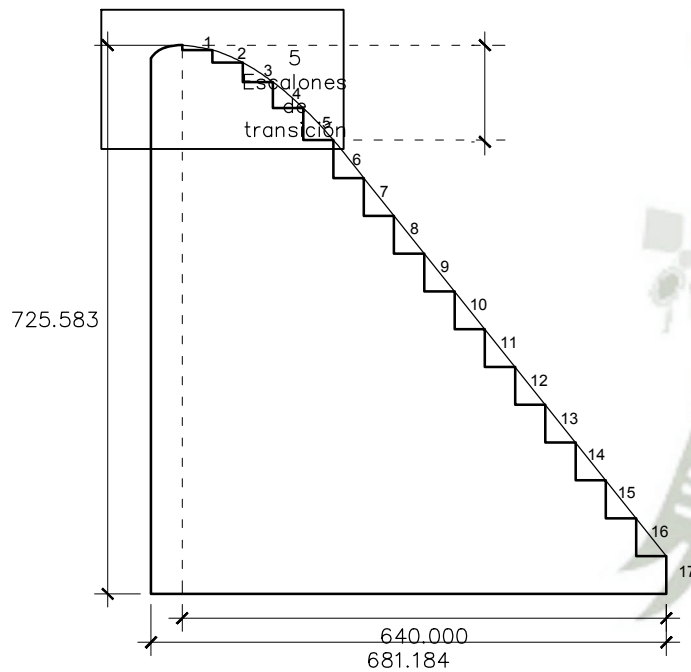
AREQUIPA
AREQUIPA

ESCALA :

1/50

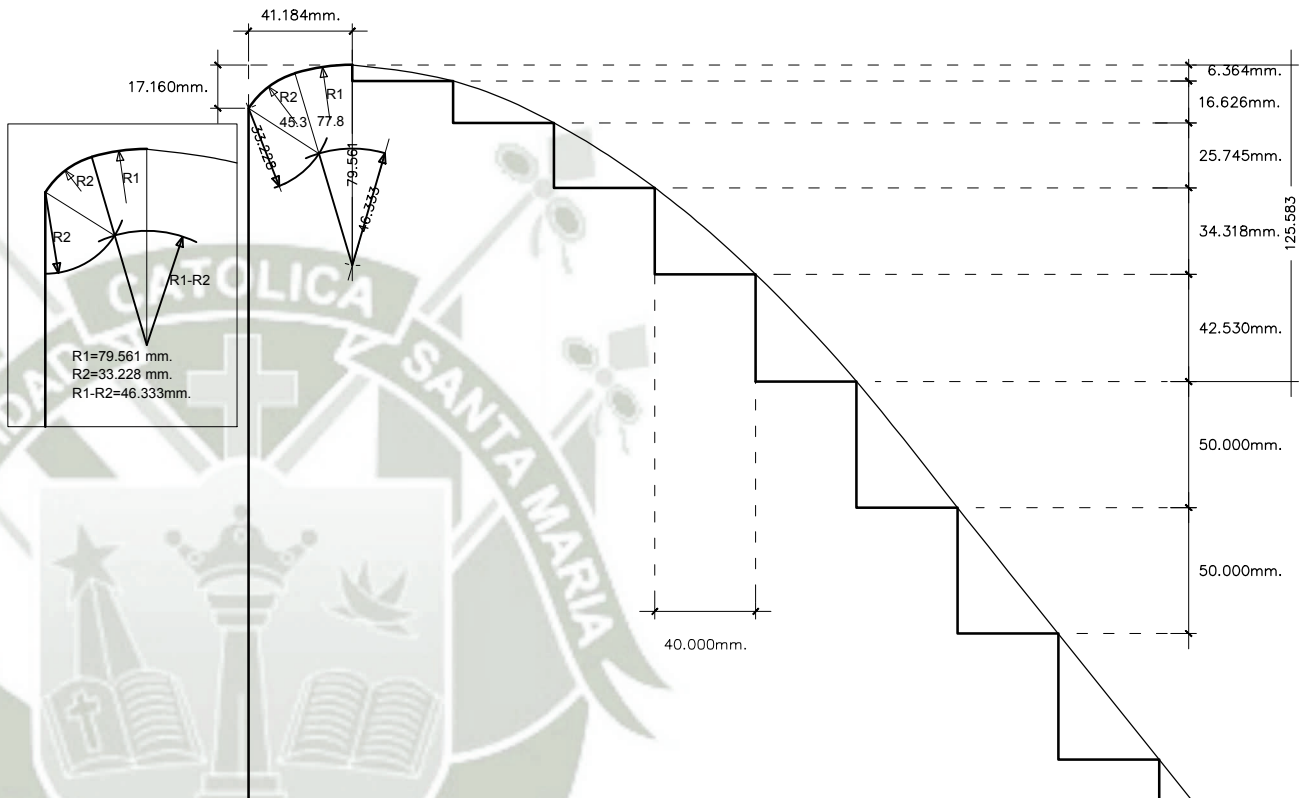
FECHA :

MAYO 2017



ALIVIADERO ESCALONADO - PERFIL

Esc: 1/10



DETALLE DE ESCALONES DE TRANSICIÓN

Esc: 1/3

AR
UCSM

PROYECTO

TESIS PREGRADO

Arnold Julian Llanos Chaiña

LÁMINA N° 01 DE 02

E 02

PLANO :

DETALLE ALIVIADERO ESCALONADO

UBICACIÓN :

DEPARTAMENTO:
PROVINCIA:
DISTRITO:

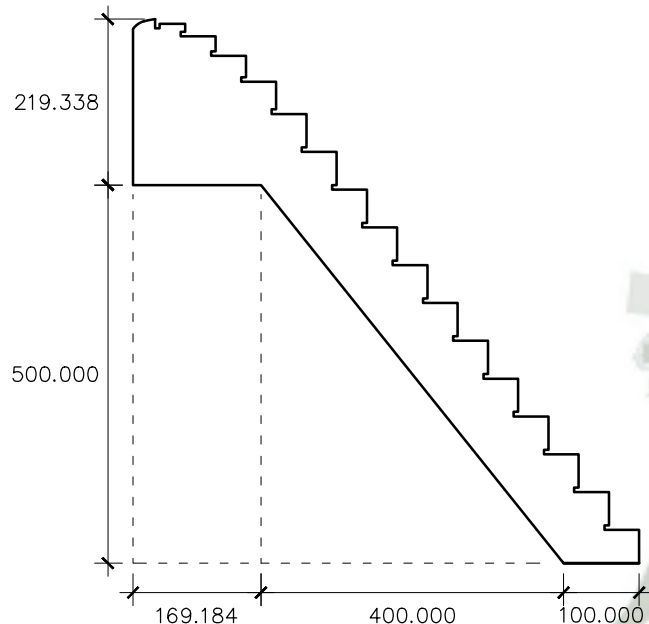
AREQUIPA
AREQUIPA
-

ESCALA :

INDICADA

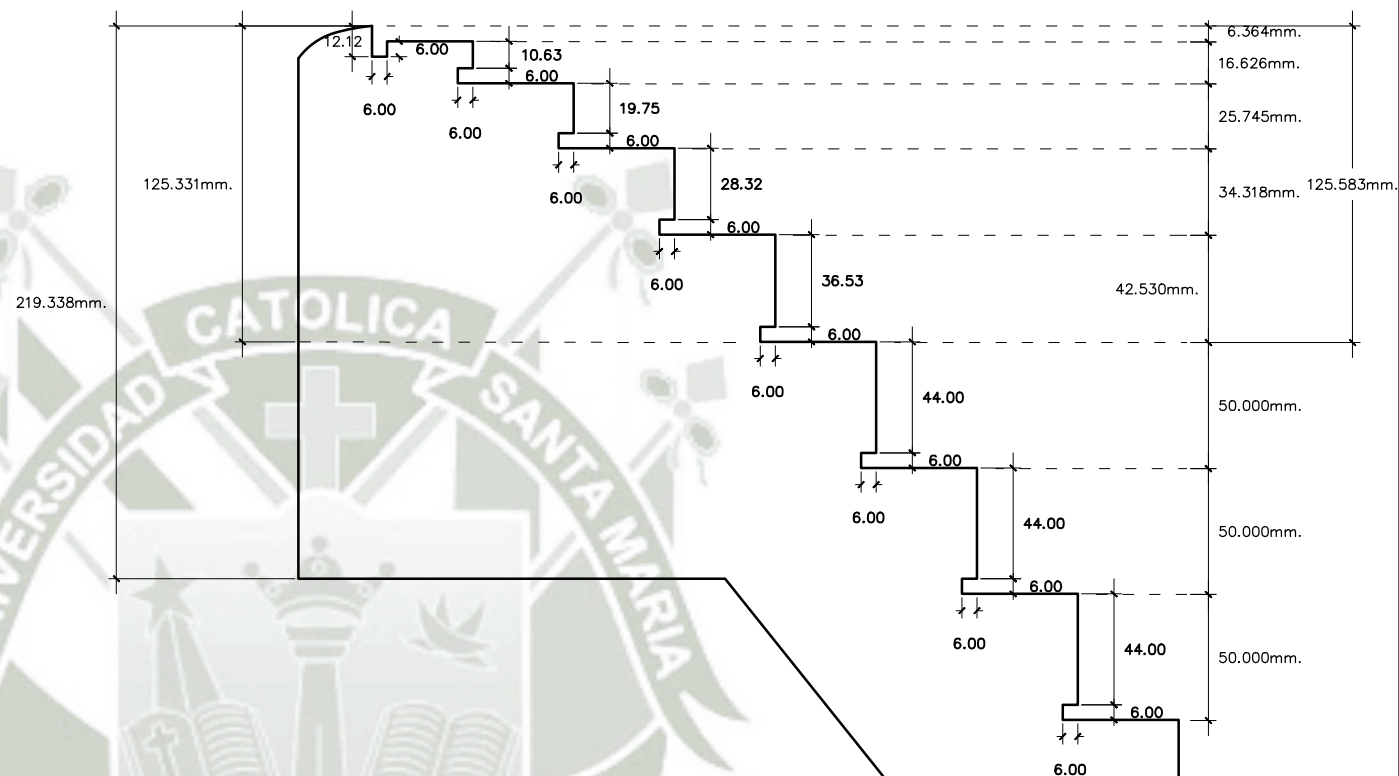
FECHA :

MAYO 2017



ESTRUCTURA DE SOPORTE
ALIVIADERO ESCALONADO - PERFIL

Esc: 1/10



ESTRUCTURA DE SOPORTE
DETALLE DE ESCALONES DE TRANSICIÓN

Esc: 1/3

AR

U C S M

PROYECTO

TESIS PREGRADO

Arnold Julian Llanos Chaiña

LÁMINA N° 01 DE 02

PLANO :

ESTRUCTURA DE SOPORTE
ALIVIADERO ESCALONADO

ESCALA :

INDICADA

E 02

UBICACIÓN :

DEPARTAMENTO:
PROVINCIA:
DISTRITO:

AREQUIPA
AREQUIPA
—

FECHA :

ABRIL 2017



ANEXO B - TABLAS

CUADRO RESUMEN DE DATOS DE LABORATORIO

Q (l/s)	q (m ³ /s/s)	Yc	V5(m/s)	Área (m ²)	Energía Ec. Bernoulli	Energía Ec. Chanson
10.657	0.023	0.0381	1.4261	0.0075	84.7%	85.45%
10.657	0.023	0.0381	1.4261	0.0075	84.7%	85.45%
11.087	0.024	0.0391	1.6524	0.0067	80.4%	81.09%
11.305	0.025	0.0396	1.7651	0.0064	78.0%	78.66%
11.968	0.026	0.0412	1.5388	0.0078	82.5%	83.32%
12.305	0.027	0.0419	1.4942	0.0082	83.3%	85.01%
13.425	0.029	0.0444	1.4199	0.0095	84.4%	83.75%
14.402	0.031	0.0466	1.4529	0.0099	83.9%	83.19%
15.037	0.033	0.0479	1.4717	0.0102	83.4%	86.89%
15.129	0.033	0.0481	1.4589	0.0104	83.6%	82.57%
15.621	0.034	0.0492	1.7072	0.0092	78.9%	82.00%
15.869	0.035	0.0497	1.4866	0.0107	83.0%	79.41%
16.245	0.036	0.0505	1.5899	0.0102	81.1%	78.58%
16.371	0.036	0.0507	1.6023	0.0102	80.9%	80.73%
17.199	0.038	0.0524	1.6111	0.0107	80.6%	78.31%
17.782	0.039	0.0536	1.5973	0.0111	80.9%	79.49%
19.642	0.043	0.0573	1.7889	0.0110	77.0%	78.05%
20.187	0.044	0.0583	1.7418	0.0116	77.9%	79.04%
20.600	0.045	0.0591	1.8011	0.0114	76.6%	77.78%
21.330	0.047	0.0605	1.6651	0.0128	79.3%	80.55%
21.963	0.048	0.0617	1.8231	0.0120	76.1%	77.28%
21.963	0.048	0.0617	1.8231	0.0120	76.1%	77.28%
23.144	0.051	0.0639	1.8508	0.0125	75.4%	76.67%
23.579	0.052	0.0647	1.9572	0.0120	73.1%	74.27%
24.905	0.054	0.0671	1.8146	0.0137	76.1%	77.42%
25.128	0.055	0.0675	1.8309	0.0137	75.7%	77.07%
25.595	0.056	0.0683	1.9516	0.0131	73.1%	74.39%
26.287	0.057	0.0696	1.9813	0.0133	72.4%	73.71%
26.674	0.058	0.0702	2.0339	0.0131	71.2%	72.47%
26.752	0.058	0.0704	1.8085	0.0148	76.1%	77.51%
27.376	0.060	0.0715	2.0170	0.0136	71.6%	72.88%
27.689	0.061	0.0720	1.9736	0.0140	72.5%	73.89%
27.925	0.061	0.0724	2.0575	0.0136	70.6%	71.91%
30.201	0.066	0.0763	2.1068	0.0143	69.4%	70.74%
30.688	0.067	0.0771	1.8984	0.0162	74.0%	75.54%
30.932	0.068	0.0775	2.0697	0.0149	70.2%	71.64%
31.546	0.069	0.0785	2.1326	0.0148	68.7%	70.12%
33.917	0.074	0.0824	1.9339	0.0175	73.0%	74.73%
34.805	0.076	0.0839	2.1132	0.0165	69.0%	70.62%
36.606	0.080	0.0867	2.1056	0.0174	69.2%	70.82%

Q (l/s)	q (m ³ /s/s)	Yc	V5(m/s)	Área (m ²)	Energía Ec. Bernoulli	Energía Ec. Chanson
36.736	0.080	0.0869	2.2100	0.0166	66.7%	68.27%
38.705	0.085	0.0900	2.0975	0.0185	69.3%	71.02%
38.705	0.085	0.0900	2.0975	0.0185	69.3%	71.02%
38.970	0.085	0.0904	2.0281	0.0192	70.8%	72.61%
40.172	0.088	0.0923	2.2709	0.0177	65.1%	66.78%
40.441	0.088	0.0927	2.1736	0.0186	67.5%	69.21%
42.478	0.093	0.0958	2.0633	0.0206	69.9%	71.80%
43.028	0.094	0.0966	2.3318	0.0185	63.6%	65.27%
43.303	0.095	0.0970	2.2536	0.0192	65.5%	67.27%
44.413	0.097	0.0987	2.3114	0.0192	64.0%	65.83%
45.158	0.099	0.0998	2.3690	0.0191	62.6%	64.35%
45.815	0.100	0.1007	2.4228	0.0189	61.2%	62.93%
50.701	0.111	0.1078	2.6812	0.0189	54.1%	55.79%
52.174	0.114	0.1099	2.7591	0.0189	51.9%	53.52%
54.263	0.119	0.1128	2.8696	0.0189	48.6%	50.21%
12.731	0.028	0.0429	1.5460	0.0082	82.3%	79.98%
19.170	0.042	0.0564	1.7220	0.0111	78.4%	79.47%
27.807	0.061	0.0722	1.9820	0.0140	72.3%	73.69%
38.176	0.083	0.0892	2.2967	0.0166	64.5%	66.08%
39.956	0.087	0.0920	2.0794	0.0192	69.6%	64.44%

CUADRO RESUMEN DE PARÁMETROS ADIMENSIONALES

Q (l/s)	Yc/ks	F	Re	We	We	Re	F yc/h
10.657	1.21983	3.6	13857	444	448	23293.7	2.714924
10.657	1.21983	3.6	13857	444	448	23293.7	2.714924
11.087	1.25247	4.4	14515	535	540	24234.9	3.4083482
11.305	1.26881	4.8	14841	583	588	24710.8	3.7750832
11.968	1.31794	3.8	15520	538	543	26160	3.1023759
12.305	1.34256	3.6	15892	537	542	26896.4	2.9823197
13.425	1.42283	3.2	17153	557	562	29344	2.8028398
14.402	1.49103	3.2	18327	611	617	31478.9	2.9352874
15.037	1.53456	3.1	19085	647	652	32867.7	3.0140958
15.129	1.54079	3.1	19176	645	651	33068	2.9778544
15.621	1.57404	3.9	20012	779	786	34144.2	3.7898515
15.869	1.59069	3.1	20062	689	695	34687.3	3.0876316
16.245	1.61569	3.4	20618	755	761	35508.3	3.4284046
16.371	1.62403	3.4	20778	766	773	35783.6	3.4728241
17.199	1.67834	3.4	21742	810	817	37593.4	3.530697
17.782	1.71603	3.3	22390	830	837	38866.8	3.5045642
19.642	1.83375	3.7	24766	1027	1036	42933.9	4.2233432
20.187	1.86751	3.5	25319	1027	1036	44125.1	4.0760816
20.600	1.89287	3.6	25870	1084	1094	45026.8	4.3004615
21.330	1.93732	3.2	26474	1038	1047	46622.3	3.8449536
21.963	1.9755	3.6	27439	1170	1180	48007.2	4.4264729
21.963	1.9755	3.6	27439	1170	1180	48007.2	4.4264729
23.144	2.04567	3.6	28801	1251	1262	50587.8	4.5674805
23.579	2.07125	3.9	29458	1348	1360	51539.5	4.9824959
24.905	2.14816	3.3	30672	1320	1332	54436.6	4.4885788
25.128	2.161	3.4	30948	1344	1356	54925.6	4.5559774
25.595	2.18769	3.7	31686	1459	1472	55946.1	5.0294851
26.287	2.22694	3.7	32501	1522	1535	57458.6	5.1677372
26.674	2.24875	3.8	33022	1585	1599	58304.6	5.3877914
26.752	2.25311	3.2	32653	1413	1426	58474.2	4.5196448
27.376	2.28799	3.7	33759	1613	1627	59837.5	5.3439085
27.689	2.30544	3.6	34014	1597	1611	60523.1	5.1821276
27.925	2.31852	3.8	34437	1679	1693	61039	5.523933
30.201	2.44282	3.8	37004	1859	1875	66012.9	5.7988772
30.688	2.469	3.2	37031	1702	1717	67076.8	4.9733594
30.932	2.48209	3.7	37707	1870	1887	67611	5.6690565
31.546	2.51482	3.8	38504	1965	1983	68952.8	5.9486203
33.917	2.63928	3.2	40468	1916	1933	74134.4	5.1996533
34.805	2.68518	3.6	41894	2149	2168	76076.5	5.9649006
36.606	2.77704	3.4	43732	2252	2272	80013.9	5.9828233
36.736	2.78361	3.7	44163	2372	2393	80297.9	6.4370644

Q (l/s)	Yc/ks	F	Re	We	We	Re	F yc/h
38.705	2.88218	3.3	45838	2372	2393	84600.4	6.0038579
38.705	2.88218	3.3	45838	2372	2393	84600.4	6.0038579
38.970	2.89533	3.2	45868	2309	2329	85180.2	5.7147383
40.172	2.95455	3.7	47872	2665	2689	87807.1	6.8053421
40.441	2.96772	3.4	47834	2568	2591	88394.8	6.3800735
42.478	3.06658	3.1	49449	2561	2583	92848.2	5.948989
43.028	3.09297	3.7	50957	2931	2957	94049.4	7.1625866
43.303	3.10618	3.5	50968	2851	2876	94652.2	6.8126506
44.413	3.15901	3.6	52274	2999	3026	97077.4	7.1060568
45.158	3.19426	3.7	53217	3125	3153	98706.9	7.3938115
45.815	3.22513	3.8	54057	3243	3272	100141	7.6655204
50.701	3.45058	4.2	59823	3972	4007	110823	9.0761905
52.174	3.51708	4.3	61561	4206	4243	114042	9.5198837
54.263	3.61036	4.5	64026	4549	4589	118609	10.163646
12.731	1.37339	3.7	16442	575	580	27828	3.156464
19.170	1.80425	3.5	24139	964	973	41902.2	3.9725116
27.807	2.31198	3.6	34159	1610	1624	60780.9	5.2189631
38.176	2.85588	3.8	45894	2562	2584	83445.1	6.8630365
39.956	2.94395	3.2	47028	2427	2449	87334.6	5.9576649



CUADRO RESUMEN DE PRESIONES A LO LARGO DEL ALIVIADERO

PRESIONES A LO LARGO DEL ALIVIADERO										
Eje X	0.053	0.062	0.071	0.135	0.143	0.152	0.255	0.265	0.274	0.375
yc/h	1.703	1.991	2.28	4.329	4.585	4.857	8.17	8.475	8.763	12.01
0.78	-0.06	-0.10	0.32	-1.50	-3.52	0.87	3.43	0.91	1.98	0.56
0.79	0.16	-0.06	0.00	-1.48	-4.13	0.92	0.75	0.86	1.94	0.58
0.98	0.41	0.22	0.32	-1.50	-3.06	0.99	0.70	2.15	2.04	0.58
1.01	0.40	0.24	0.46	-1.50	-3.06	0.95	0.80	1.20	2.31	0.70
1.15	0.76	1.01	1.04	0.55	0.69	1.02	0.98	1.06	1.53	0.77
1.28	0.80	1.08	1.14	0.60	0.59	0.62	0.99	1.08	1.45	0.76
1.43	0.82	1.12	1.18	0.58	0.64	1.10	0.97	1.18	1.53	0.78
1.39	0.81	1.12	1.18	0.58	2.67	1.08	0.88	1.20	1.51	0.77
1.57	0.80	1.09	1.22	0.54	0.67	1.09	1.08	1.05	1.86	0.82
1.80	0.72	1.10	1.25	0.51	0.57	1.13	1.07	1.27	1.05	0.85
1.93	0.66	1.04	1.25	0.53	0.58	1.15	1.08	1.14	1.72	0.91
2.01	0.64	1.02	1.28	0.50	0.61	0.99	1.11	1.24	1.74	0.93
0.76	0.66	0.82	0.63	0.52	0.55	0.58	0.77	0.95	1.61	0.55
0.84	0.74	0.88	0.88	0.53	0.56	0.93	1.08	1.06	2.08	0.58
0.93	0.76	0.90	0.96	0.52	0.60	1.93	0.88	1.13	2.78	-
0.96	0.78	0.92	0.96	0.52	0.58	0.94	0.88	0.95	1.87	0.62
1.17	0.82	1.02	1.08	0.56	0.65	1.98	0.96	0.99	1.82	0.90
1.23	0.82	1.08	1.12	0.60	0.63	1.06	0.94	0.81	1.61	0.80
1.34	0.82	1.14	1.18	0.56	0.61	1.05	0.92	1.05	1.69	1.00
1.41	0.82	1.12	1.08	0.58	0.67	1.04	0.21	1.20	1.70	0.85
1.55	0.80	1.18	1.24	0.60	0.63	1.09	0.95	1.00	2.11	0.91
0.76	0.74	0.86	0.87	0.53	0.57	0.94	0.84	0.77	1.91	0.57
0.89	0.78	0.92	0.94	0.55	0.57	0.50	0.56	0.86	1.71	0.58
0.96	0.79	0.95	0.99	0.55	0.57	1.04	0.76	0.90	2.00	0.63
1.07	0.81	0.98	1.06	0.57	0.62	0.93	0.90	0.63	1.58	0.75
1.18	0.82	1.04	1.10	0.59	0.71	1.10	0.97	0.81	1.73	0.85
1.35	0.82	1.10	1.18	0.59	0.64	1.07	0.95	0.82	1.72	0.85
1.45	0.81	1.11	1.21	0.57	0.68	0.10	0.31	1.01	1.60	0.82
1.53	0.81	1.10	1.21	0.58	0.76	1.08	0.86	1.12	1.75	0.84
1.54	0.80	1.13	1.23	0.57	0.58	1.13	0.88	0.95	2.29	0.80
1.73	0.76	1.11	1.27	0.60	0.72	1.14	0.91	0.99	-0.35	3.00
1.85	0.74	1.10	1.26	0.57	0.60	1.13	0.95	1.10	1.91	0.94
1.92	0.70	1.04	1.33	0.54	0.68	2.05	0.89	1.12	2.16	0.87
2.00	0.67	1.05	1.30	0.49	0.60	1.11	1.08	1.29	2.16	0.89
1.97	0.65	1.13	1.28	0.53	0.58	1.18	1.27	1.25	1.79	0.89
1.94	0.67	1.04	1.28	0.55	0.65	1.11	2.13	1.06	2.38	0.90
1.80	0.72	1.06	1.26	0.56	0.67	1.21	0.98	1.06	1.90	0.91
1.85	0.71	1.09	1.32	0.56	0.59	1.16	1.12	1.24	1.97	0.89
1.74	0.77	1.08	1.26	0.55	0.61	1.12	0.88	1.13	2.14	0.90
1.68	0.76	1.10	1.29	0.56	0.62	1.09	1.06	1.05	2.22	0.85
1.53	0.81	1.11	1.12	0.56	0.68	1.20	1.02	1.06	0.72	0.81

PRESIONES A LO LARGO DEL ALIVIADERO										
1.44	0.82	1.11	1.21	0.59	0.70	1.10	0.85	0.93	1.64	0.83
1.40	0.82	1.12	1.20	0.59	0.71	1.13	1.04	0.02	1.80	0.77
1.37	0.81	1.13	1.18	0.57	0.69	1.08	1.10	0.88	1.67	0.80
1.29	0.82	1.11	1.16	0.61	0.67	1.03	0.98	1.00	3.75	0.77
1.23	0.82	1.09	1.17	0.59	0.60	1.11	0.92	0.92	1.64	0.79
0.99	0.80	0.94	1.12	0.55	0.60	0.96	1.03	0.94	1.26	0.65
1.05	0.98	1.00	1.04	0.57	0.61	1.03	0.79	0.78	1.83	0.79

PRESIONES A LO LARGO DEL ALIVIADERO									
Eje X	0.392	0.393	0.495	0.504	0.513	0.616	0.623	0.632	
yc/h	12.54	12.59	15.84	16.14	16.43	19.73	19.95	20.24	
0.78	1.50	1.10	0.52	0.61	1.31	0.36	0.33	-0.46	
0.79	1.21	1.32	0.54	0.62	1.41	0.42	0.40	0.60	
0.98	1.69	1.36	0.51	0.66	1.70	0.46	0.66	1.33	
1.01	2.21	1.61	0.49	0.74	1.52	0.42	0.61	1.36	
1.15	2.53	3.13	0.52	0.79	2.00	0.44	0.65	1.48	
1.28	2.71	2.29	0.70	1.02	2.27	0.44	0.76	1.57	
1.43	2.29	3.10	0.77	1.26	2.19	1.64	1.42	0.47	
1.39	2.59	2.26	0.82	1.07	2.00	0.46	0.92	1.56	
1.57	2.36	2.64	1.14	1.38	2.48	0.48	1.06	1.79	
1.80	2.39	2.56	0.89	1.33	2.64	0.84	1.10	2.18	
1.93	2.87	3.54	0.91	1.30	1.81	0.85	1.38	2.15	
2.01	2.22	2.50	0.31	1.51	2.48	0.95	2.25	3.03	
0.76	1.40	1.04	2.01	0.53	1.23	3.44	3.45	0.54	
0.84	1.34	1.35	2.00	0.64	1.34	3.46	0.50	0.95	
0.93	1.74	1.30	0.51	0.65	1.42	3.48	0.62	1.28	
0.96	1.22	2.05	0.52	0.68	1.53	0.46	0.58	1.25	
1.17	2.46	2.16	0.49	0.66	1.63	0.38	0.65	1.68	
1.23	2.32	2.39	0.70	0.69	1.54	0.42	0.68	1.65	
1.34	2.75	2.21	0.82	0.92	2.22	0.47	0.84	1.74	
1.41	2.65	2.15	0.89	0.61	2.46	0.48	0.90	1.40	
1.55	2.70	2.60	1.10	0.86	2.42	0.52	0.86	1.61	
0.76	1.31	1.68	0.50	0.53	1.26	2.40	0.35	-0.51	
0.89	1.71	1.21	6.57	6.30	6.38	0.48	0.68	1.15	
0.96	2.25	1.62	0.51	0.72	1.61	0.41	0.56	1.26	
1.07	2.13	1.73	0.51	0.69	1.68	0.46	0.62	1.56	
1.18	2.57	2.44	0.49	0.92	1.91	0.45	0.61	1.53	
1.35	2.93	2.58	0.82	1.25	2.03	0.45	0.82	1.80	
1.45	2.63	2.34	0.78	1.78	2.27	0.49	0.87	1.81	
1.53	2.57	2.47	0.95	1.07	2.74	0.47	1.51	1.93	
1.54	1.61	2.44	0.68	2.03	2.55	1.26	0.63	1.55	
1.73	2.82	2.46	-2.28	3.50	3.50	6.50	1.89	2.44	
1.85	2.52	2.15	1.00	1.56	2.48	0.71	2.09	1.97	
1.92	2.82	2.93	0.75	1.45	2.54	0.95	1.66	2.04	

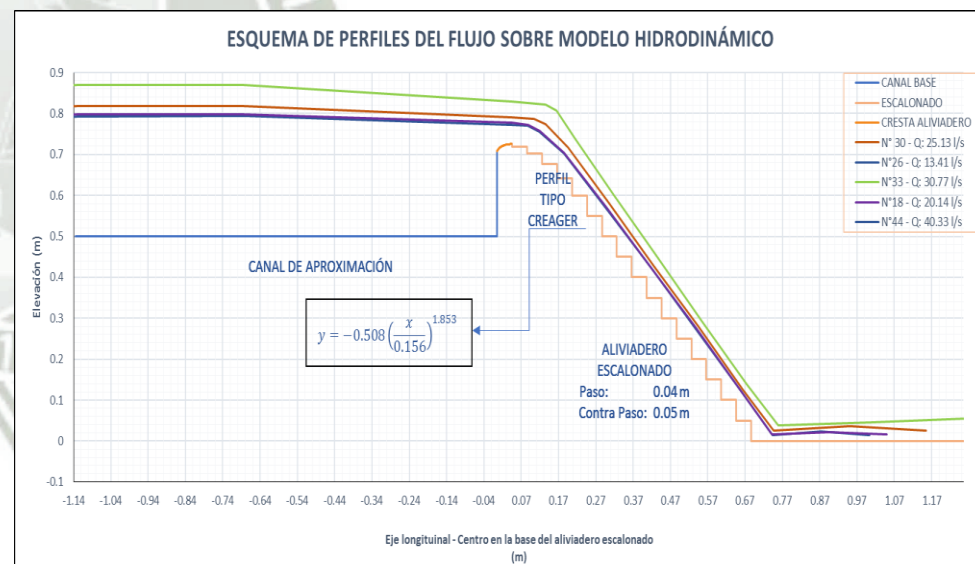
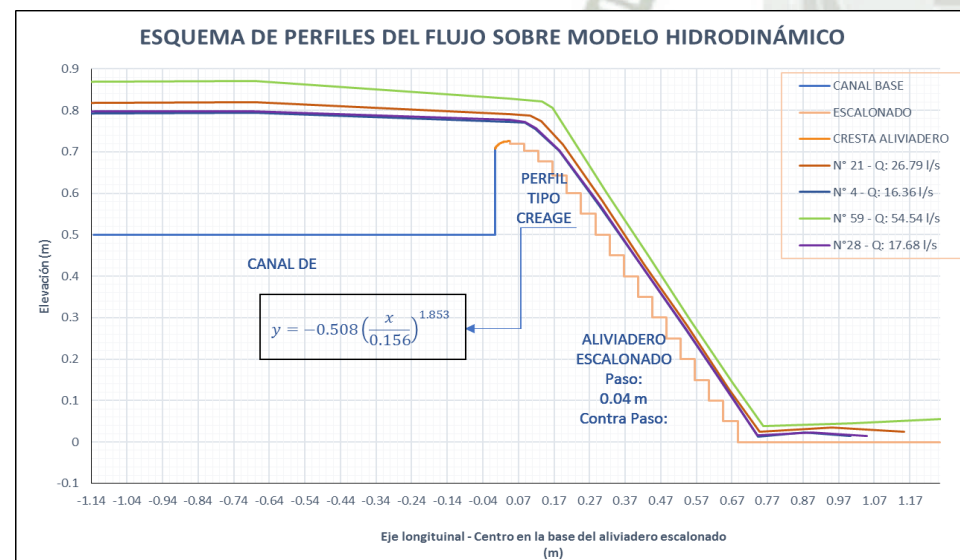
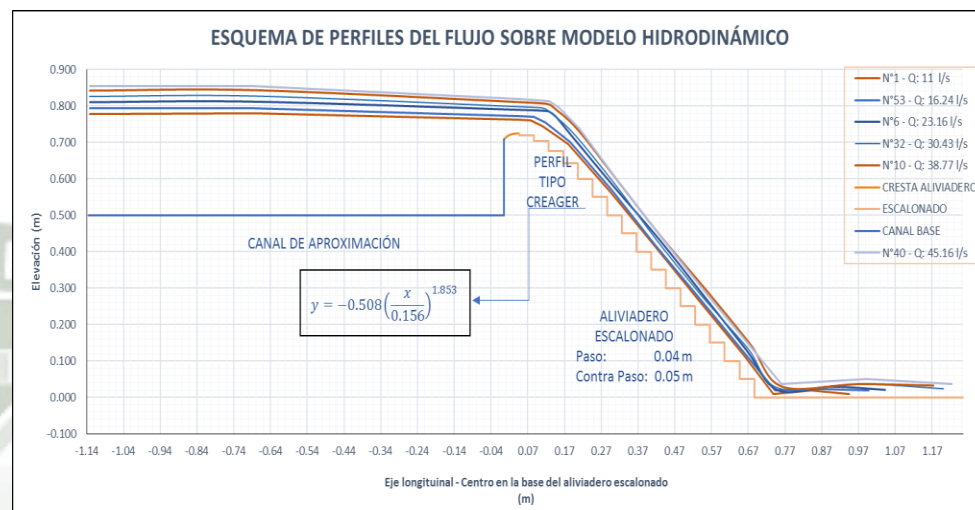
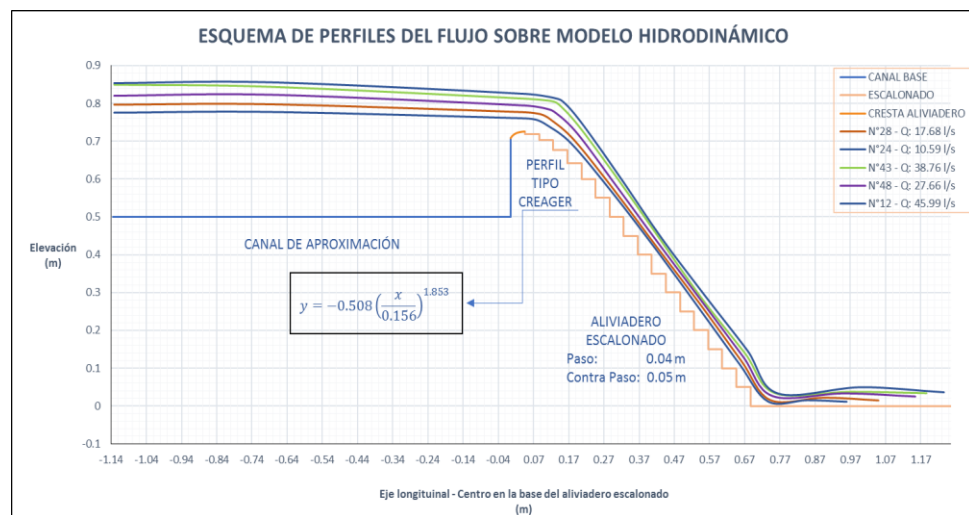
PRESIONES A LO LARGO DEL ALIVIADERO								
2.00	2.78	3.19	1.14	1.55	2.80	0.77	1.93	2.81
1.97	2.61	2.73	1.07	1.22	2.70	0.73	2.05	2.65
1.94	2.63	2.62	1.08	1.03	2.81	0.70	1.61	2.37
1.80	2.89	2.53	1.03	1.47	2.85	1.79	1.46	2.35
1.85	2.40	2.67	1.08	0.88	2.11	0.98	1.98	2.39
1.74	2.65	2.43	0.90	1.04	2.07	-0.52	1.57	2.46
1.68	2.40	2.40	0.66	1.02	3.13	-0.62	1.78	1.98
1.53	2.39	2.42	0.82	1.34	2.62	-0.50	1.13	1.96
1.44	2.43	2.95	0.95	0.76	2.53	0.48	0.84	1.64
1.40	2.47	2.20	-0.17	1.09	2.71	0.48	1.01	1.64
1.37	2.26	2.50	0.80	1.20	2.18	0.46	0.86	1.76
1.29	2.07	2.38	0.68	0.85	1.93	0.47	0.72	1.47
1.23	2.39	1.74	0.59	0.79	1.84	0.45	0.71	1.57
0.99	1.97	2.49	0.51	0.75	1.27	0.44	0.62	1.54
1.05	1.68	2.50	0.49	0.73	1.72	0.46	0.65	1.42

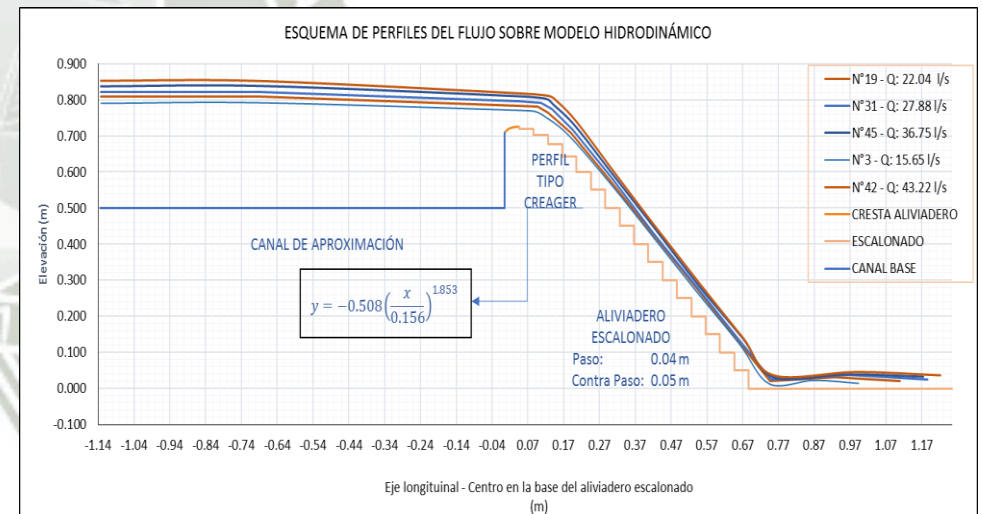
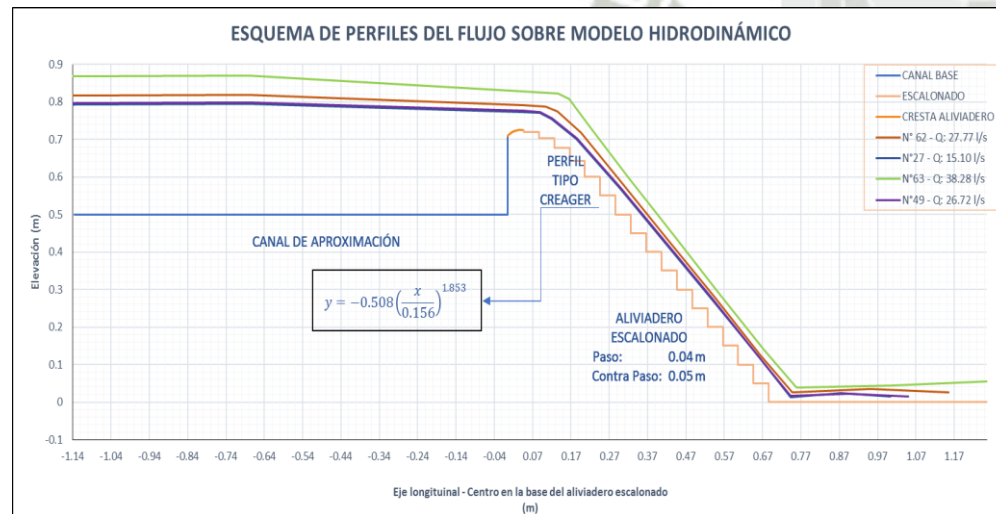
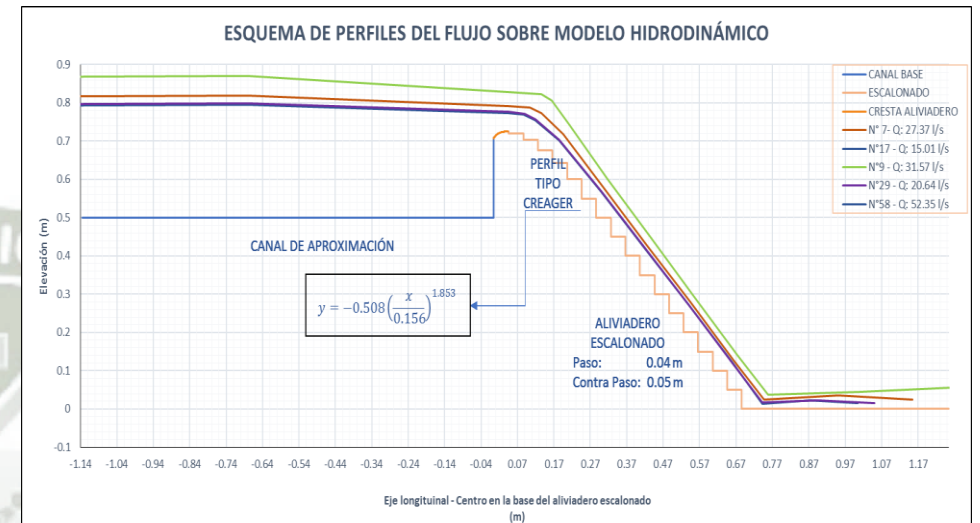
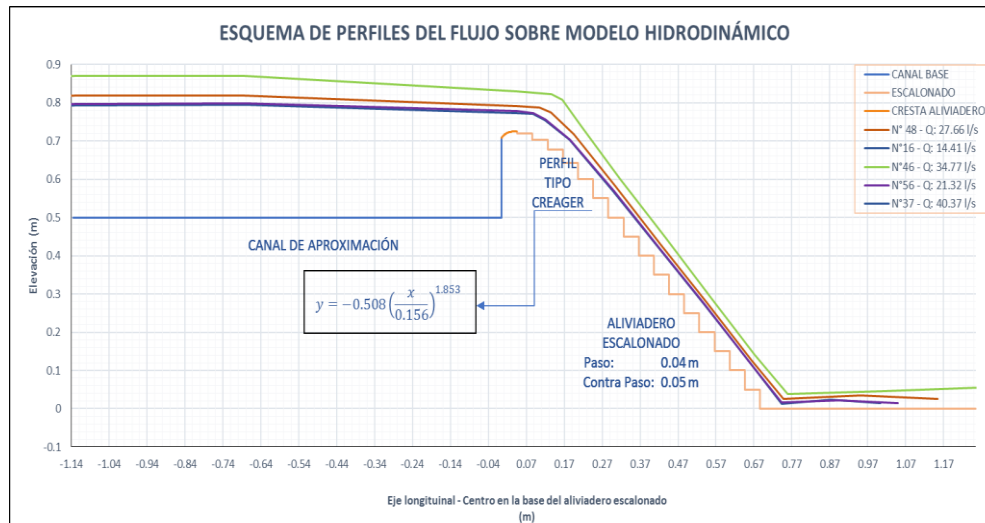


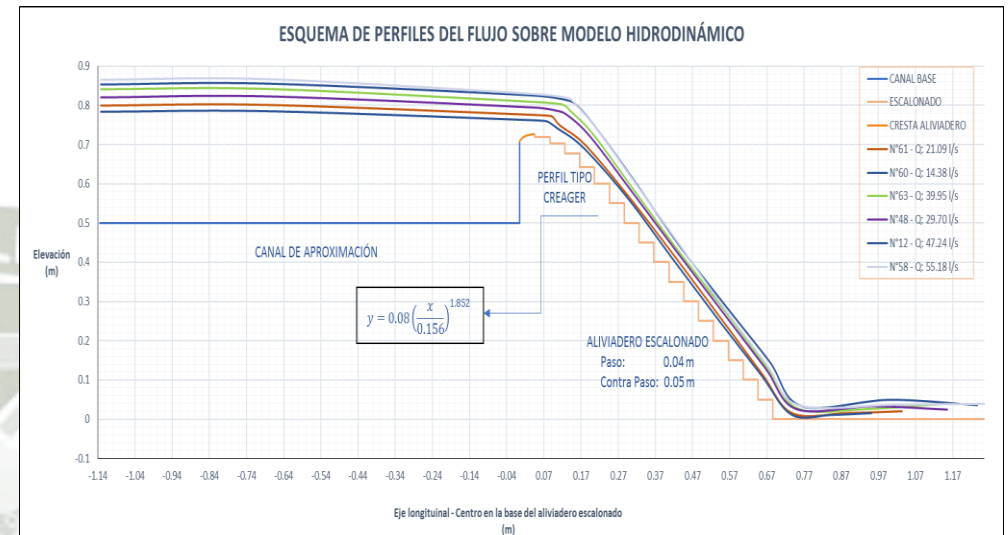
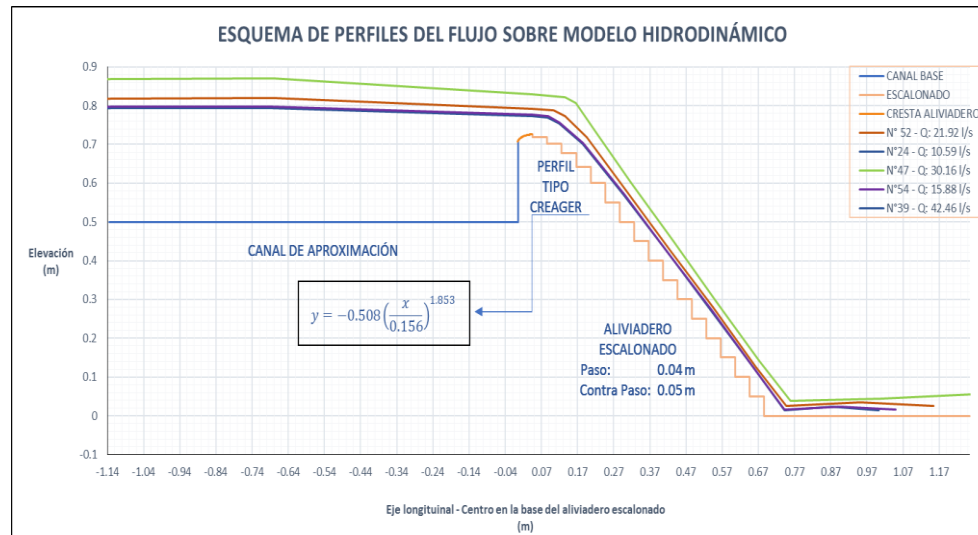


ANEXO C - GRÁFICOS

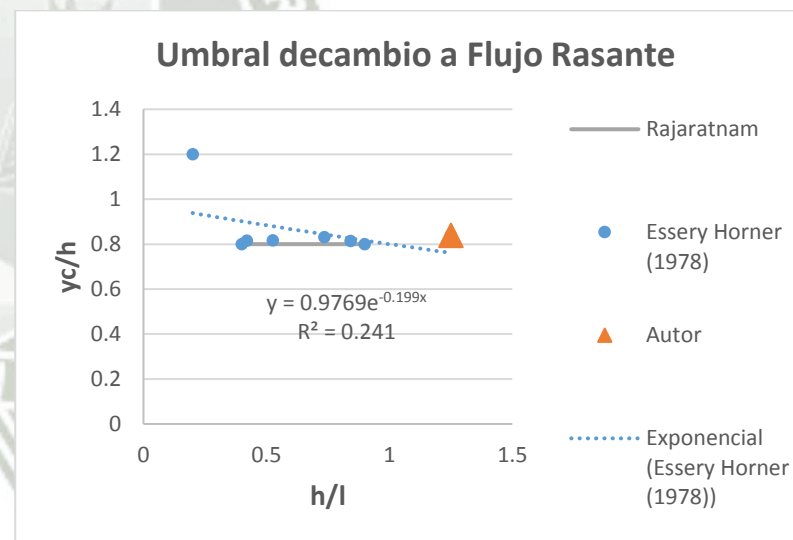
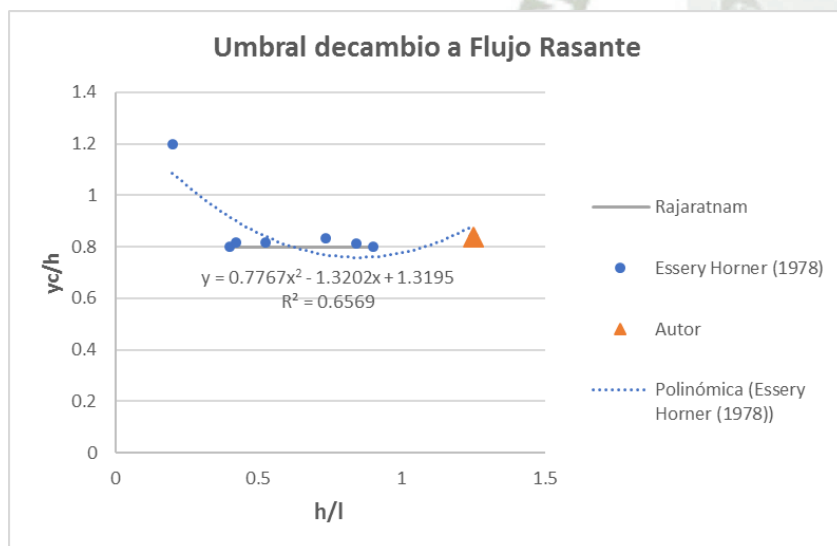
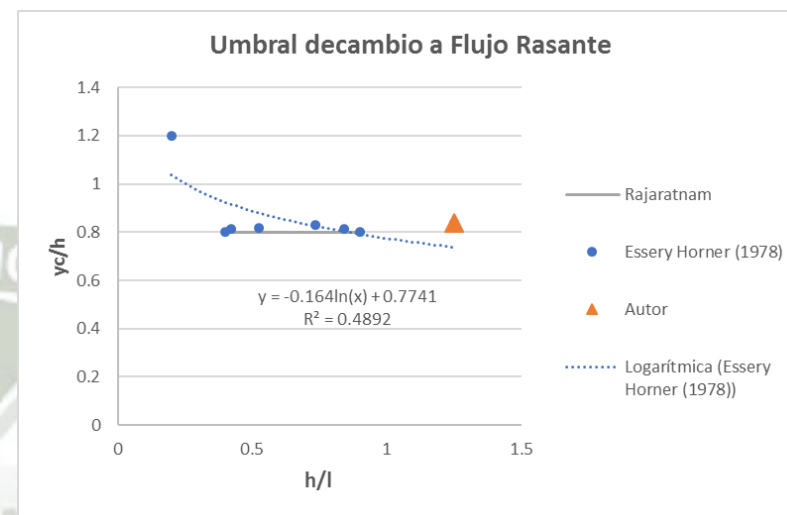
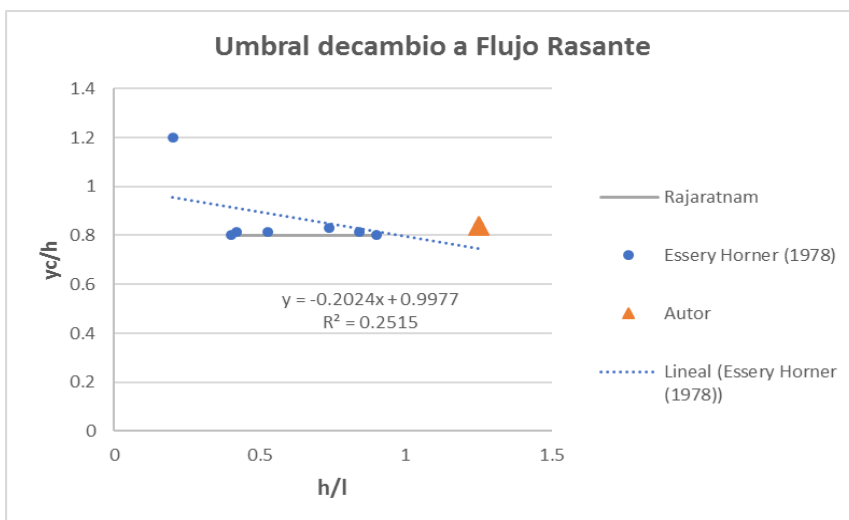
ESQUEMA DE PERFILES DE FLUJO DE ENSAYOS EN LABORATORIO







UMBRAL DE CAMBIO A FLUJO RASANTE



BIBLIOGRAFÍA

- [1] AMADOR A., Comportamiento hidráulico de los aliviaderos escalonados en presas de hormigón compactado, Dep. de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. UPC.; E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos; Jordi Girona 1-3. D-1. 08034 BARCELONA.
- [2] AMADOR A., SÁNCHEZ-JUNY M. Y DOLZ J., Diseño Hidráulico de aliviaderos escalonados en presas de HCR, Ingeniería del Agua Vol. 3, diciembre 2006, Pag. 289 a 306.
- [3] ÇENGEL Y., CIMBALA J. (2006), Mecánica de Fluidos – fundamentos y aplicaciones, McGraw-Hill Interamericana
- [4] CHANSON (1994), Hydraulics of nappe Flow regime above stepped chutes and spillways, Australian Civil Engineering transactions, IEAust, Vol. CE36 N° 1
- [5] CHANSON, H. (2007), Hydraulic Design of Stepped Spillways and Downstream Energy Dissipators for Embankment Dams, Dam Engineering, Vol. XXVII, Issue 4, Pág 255,230
- [6] CHEN Q., DAI G., H. LIU, Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow, Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, 128 (7) (2002) 683-688.
- [7] DIEZ CASCÓN, BUENO, Ingeniería de presas, presas de fábrica, Servicio de publicaciones de la universidad de Cantabria, 2001
- [8] ECHÁVEZ G. (1996), Introducción a modelos hidráulicos, Universidad Nacional Autónoma de México, México Pag 2
- [9] ESPINOSA MERA, Análisis experimental de disipación de energía, distribución de presiones y resistencia al flujo de una rápida con fondo escalonado con relación altura (h), longitud de grada (l) de $h/l=0.10$, Universidad Politécnica Nacional, Quito Ecuador, Octubre 2007.
- [10] ESTRELLA S., Comportamiento hidráulico de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales en presas de HCR, Escuela superior de ingenieros de caminos, canales y puertos de Barcelona, octubre 2013

- [11] GONZALES C., CHANSON H., Diseño hidráulico de vertedores escalonados con pendientes moderadas: metodología basada en un estudio experimental, Universidad de Quesland Australia.
- [12] NADERI, An Investigation of Energy Dissipation in Various Types of Stepped Spillways including Inclined Steps and Steps with End Sills by Numerical Model
- [13] ROJAS W., Modelamiento hidráulico para el estudio de la socavación en pilares de puentes y análisis de los métodos para su cálculo.
- [14] SÁNCHEZ-JUNY M., Comportamiento hidráulico de los aliviaderos escalonados en presas de hormigón compactado. Análisis del campo de presiones, Departamento de ingeniería Hidráulica marítima y ambiental, Barcelona Abril del 2001
- [15] USBR (1987), Design of Small Dams, Unite State department of the interior.
- [16] VEN TE CHOW (1994), Hidráulica de Canales Abiertos, McGraw-Hill. Santa fe Colombia
- [17] VERGARA S. (1993), Técnicas de modelación en hidráulica Alfaomega, México DF.

